

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**  
**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS EN TOPOGRAFÍA,**  
**GEODESIA Y CARTOGRAFÍA**  
**TITULACIÓN DE INGENIERO TÉCNICO EN TOPOGRAFÍA**  
  
**PROYECTO FIN DE CARRERA**



**ANÁLISIS DE LAS CAPACIDADES DE LOS SISTEMAS LANDSAT Y EO1**  
**PARA LA ACTUALIZACIÓN CARTOGRÁFICA. ESTUDIO DE UN CASO**  
**PRÁCTICO**

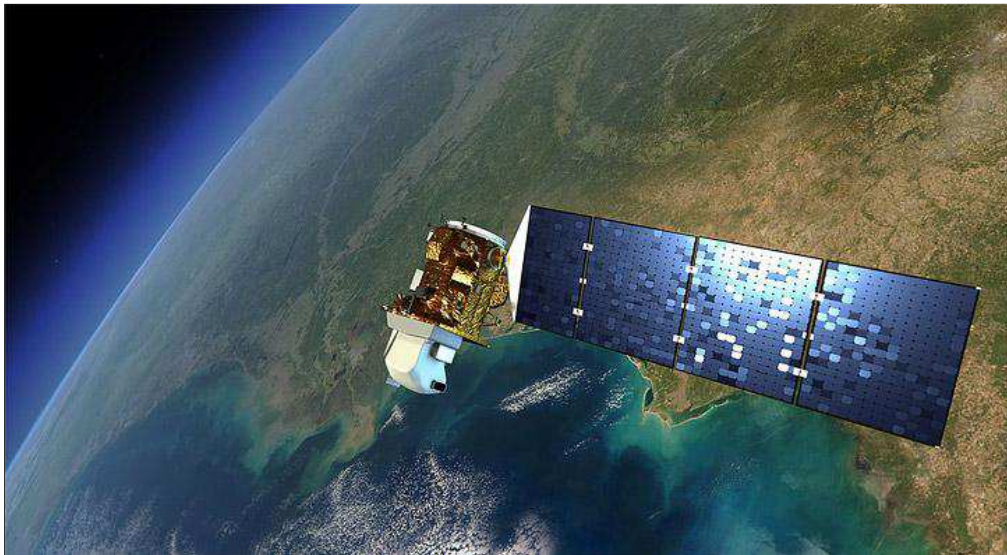
**Madrid, Enero 2014**

**Alumnas:      Andrea Sánchez García      Tutor:      Iñigo Molina Sánchez**  
**Natalia Toral Ruiz**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**  
**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS EN TOPOGRAFÍA,**  
**GEODESIA Y CARTOGRAFÍA**  
**TITULACIÓN DE INGENIERO TÉCNICO EN TOPOGRAFÍA**

**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**ANÁLISIS DE LAS CAPACIDADES DE LOS SISTEMAS LANDSAT Y EO1  
PARA LA ACTUALIZACIÓN CARTOGRÁFICA. ESTUDIO DE UN CASO  
PRÁCTICO**



**Madrid, Enero 2014**

**Alumnas:   Andrea Sánchez García**  
**Natalia Toral Ruiz**

**Tutor: Iñigo Molina Sánchez**

## **Agradecimientos**

A nuestros padres. Gracias a ellos hemos llegado a ser lo que somos hoy y al apoyo incondicional que nos han dado en todo momento. Por soportarnos en los momentos difíciles de la carrera y animarnos a conseguir nuestras metas.

A nuestro tutor Don Iñigo Molina Sánchez. Gracias a él se nos brindó la oportunidad de realizar este proyecto. Siempre ha estado ahí para asesorarnos, ayudarnos y guiarnos de la mejor manera posible. Por todo eso y su cariño le agradecemos el tiempo que nos ha dedicado.

A mi compañera Andrea por ayudarme, por estar a mi lado siempre que lo he necesitado y por todos los ratos buenos que he pasado haciendo este trabajo. Por todo eso y mucho más, gracias.

Para finalizar, agradezco a mi compañera Natalia por todos los momentos de aprendizaje, experiencias vividas y por ese sentido del humor en los peores momentos. Gracias de todo corazón.

## **RESUMEN DEL PROYECTO**

Junto con el incremento de la resolución espacial, el desarrollo de las técnicas de interpretación multiespectrales e hiperespectrales es otro de los campos de investigación actual en teledetección. Es de suponer que una de las vías naturales de evolución de las plataformas espaciales será sin duda la incorporación de sensores de mayor resolución espectral. A partir de ahí se comenzará a sustituir el tradicional análisis multiespectral, basado en los datos de a lo sumo cinco o seis bandas, por el hiperespectral, que habrá de manejar datos de varios centenares de bandas simultáneamente. Ya existen satélites con sensores hiperespectrales en órbita, como Hyperion, montado sobre el satélite EO-1, el cual estudiamos en este proyecto.

La detección de cambios, surge ante la necesidad de actualizar la cartografía de forma periódica. La evaluación de cambios producidos en el terreno se realiza manualmente y requiere de la supervisión por parte de un operador experto. Esto implica una importante inversión en tiempo, con su consecuente coste económico. Las imágenes satélite constituyen una valiosa fuente para estudiar los cambios que se producen en la superficie terrestre. En un ciclo productivo basado en imágenes numéricas, es de esperar que se ahorre una importante cantidad de trabajo introduciendo procedimientos de detección de cambios que se puedan implementar en procesos de carácter automático. Desde hace unas décadas, se están utilizando como fuentes de datos para diversos usos en detección de cambios, los sensores transportados en plataformas aeroespaciales.

En resumen, el objetivo de éste proyecto es analizar los métodos de análisis multitemporal aplicados a imágenes de satélite, para lo cual se hará un estudio comparativo de las características de las imágenes proporcionadas por las plataformas Landsat y EO-1. Como resultado de ello, se obtendrá documentación cartográfica.



## ÍNDICE

<b>Capítulo 1. Introducción y objetivos del proyecto</b>	<b>8</b>
1.1 Antecedentes Generales	8
1.2 Objetivos del proyecto	8
1.3 Fundamentos de la Teledetección	9
1.3.1 Concepto de Teledetección	9
1.3.2 Cobertura global y sinóptica	10
1.3.3 Frecuencia temporal y actualización de datos	10
1.3.4 Homogeneidad de datos	11
1.3.5 Formato digital	11
1.4 Componentes del sistema de Teledetección	12
1.5 Fundamentos físicos	13
1.5.1 Fundamentos de observación remota	13
1.5.2 Radiación electromagnética	14
1.5.3 Espectro electromagnético	16
1.5.4 Radiación del cuerpo negro	17
1.5.5 Leyes fundamentales de la radiación	17
1.5.6 Procesos de iteración de la radiación electromagnética con la materia.	19
1.6 Características espectrales del suelo	19
1.6.1 Composición y propiedades físicas	20
1.6.2 Influencia del estado superficial del suelo	21
<b>Capítulo 2. Satélites, plataformas y sensores. Principales características</b>	<b>22</b>
2.1 Satélites de Observación	22
2.2 Sensores	23
2.2.1 Tipos de sensores	23
2.2.2 Cualidades de los sensores	26
2.3 Plataformas	27
2.3.1 Plataformas Landsat	28
2.3.2 Plataforma EO-1	31
2.3.3 Landsat 8	33
2.4 Tipos de imágenes utilizadas	34
2.4.1 Imagen pancromática	35
2.4.2 Imagen multiespectral	35
2.5 Correcciones de las imágenes	36
2.5.1 Correcciones radiométricas	36
2.5.2 Correcciones geométricas	36



<b>Capítulo 3. Fusión de imágenes</b>	<b>38</b>
3.1 Principio de fusión	38
3.2 Proceso de los métodos de integración	38
3.3 Clasificación y documentación de los algoritmos	41
3.3.1 Algoritmos clásicos basados en sustitución de componentes	41
3.3.2 Algoritmos basados en operaciones aritméticas	45
3.3.3 Algoritmos jerárquicos basados en convoluciones y aplicación de filtros	51
3.4 Clasificación y documentación de los algoritmos de medidas de calidad	55
3.4.1 Métodos cualitativos (medidas subjetivas)	56
3.4.2 Métodos cuantitativos	57
 <b>Capítulo 4. Métodos de análisis multitemporal</b>	 <b>63</b>
4.1 Técnicas de detección de cambios	63
4.1.1 Métodos cualitativos	63
4.1.2 Métodos cuantitativos	64
 <b>Capítulo 5. Aplicación de las técnicas de Fusión de imágenes a la Actualización de Entidades Cartográficas</b>	 <b>66</b>
5.1 Selección de la zona e imágenes	66
5.1.1 Infraestructuras	67
5.1.2 Geografía física de la comarca Arganda del Rey	67
5.2 Imágenes	68
5.2.1 Imágenes adquiridas	68
5.2.2 Estado de las imágenes adquiridas	72
5.3 Aplicación de los métodos de fusión	73
5.3.1 Imágenes Landsat	73
5.3.2 Remuestreo	76
5.4 Análisis de los resultados	76
5.4.1 Análisis visual	76
5.4.2 Coeficiente de Correlación	77
5.4.3 RMSE	80
5.5 Detección de cambios	82
5.5.1 Deltacue	82
5.5.2 Actualización cartográfica	84
5.5.3 Cartografía derivada	87
 <b>Capítulo 6. Presupuesto</b>	 <b>88</b>
 <b>BIBLIOGRAFÍA</b>	 <b>89</b>
 <b>ANEXOS</b>	 <b>90</b>



## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1.1	Etapas de la teledetección	9
Fig. 1.2	Evolución de la teledetección	10
Fig. 1.3	Componentes del sistema de teledetección	12
Fig. 1.4	Observación remota	14
Fig. 1.5	Radiación electromagnética	14
Fig. 1.6	Campo electromagnético	15
Fig. 1.7	Espectro electromagnético	16
Fig. 1.8	Radiación en un cuerpo negro	17
Fig. 1.9	Ley de Wien	18
Fig. 2.1	Satélites de órbita polar y satélites geoestacionarios	23
Fig. 2.2	Representación visual de las ópticas de carburo de silicio	32
Fig. 2.3	Landsat 8	33
Fig. 2.4	Instrumentos de observación del Landsat 8	34
Fig.3.1	Vecino más próximo	39
Fig.3.2	Interpolación bilineal	39
Fig.3.3	Convolución cúbica	40
Fig.3.4	Proceso de fusión	40
Fig.3.5	Sustitución de componentes	41
Fig.3.6	Algoritmo Mallat	50
Fig.3.7	Método de fusión basado en el algoritmo de Mallat	51
Fig.3.8	Algoritmo à trous	52
Fig.3.9	Cálculo de los coeficientes wavelet en algoritmo de à trous	53
Fig.3.10	Esquema de método de fusión MDMR	55
Fig.3.11	Factor de Compromiso	60
Fig.5.1	Localización Arganda del Rey	66
Fig.5.2	Desembocadura del Manzanares en el Jarama con Arganda de fondo	67
Fig.5.3	Vista de la Dehesa del Carrascal	68
Fig.5.4	Gráfico de las bandas espectrales Landsat 7 ETM+	69
Fig.5.5	Gráfico de las bandas espectrales Landsat 8 OLI	70
Fig.5.6	Gráfico de las bandas espectrales EO-1 ALI	71
Fig.5.7	Características de la proyección	72
Fig.5.8	Captura del proceso Pca por el programa Erdas	73
Fig.5.9	Fusión por componentes principales	74
Fig.5.10	Fusión por brovey	74
Fig.5.11	Fusión por wavelet	74
Fig.5.12	Fusión por Grand-Schmidt	75
Fig.5.13	Visualización de los cuatro métodos de fusión	75
Fig.5.14	Visualización del remuestreo de los cuatro métodos de fusión	76
Fig.5.15	Visualización de las cuatro fusiones aplicadas	77
Fig.5.16	Diagrama del coeficiente de correlación	77
Fig.5.17	Gráfica de regresión	78
Fig.5.18	Diagrama del cálculo de los parámetros numéricos	78
Fig.5.19	Metadata de la imagen	79
Fig.5.20	Cálculos para la recta de regresión en el Landsat 8	79
Fig.5.21	Gráficas de las rectas de regresión por el algortimo Wavelet	80
Fig.5.22	Proceso de la ecuación RMSE	81
Fig.5.23	Gráfica de los resultados del RMSE	82
Fig.5.24	Umbrales	83
Fig.5.25	Histograma de los umbrales	83
Fig.5.26	Imagen de los valores de los umbrales	83
Fig.5.27	Imágenes con la detección de cambios	84
Fig.5.28	Máscara de cambios con el Landsat 7 en Arganda del Rey	84
Fig.5.29	Máscara de cambios con el Landsat 7 en la zona del Ensanche de Vallecas	85



Fig.5.30	Mapa Topográfico Nacional escala 1:50.000	85
Fig.5.31	Máscara de cambios con MTN	86
Fig.5.32	Cartografía derivada con máscara de cambios con MTN	87
Fig.6.1	Tabla de tareas y costos	88
Fig.6.2	Informe del costo previsto	88

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Características de la región espectral	16
Tabla 2	Valores de K de la Ley de Wien	19
Tabla 3	Principales características de los satélites Landsat	30
Tabla 4	Comparación y características del Landsat 7 y del EO-1	33
Tabla 5	Comparación de los modos pancromáticos y multiespectrales	35
Tabla 6	Clasificación de las plataformas	68
Tabla 7	Esquema de bandas Landsat 7 ETM+	69
Tabla 8	Esquema de bandas Landsat 8 OLI	70
Tabla 9	Esquema de bandas EO-1 ALI	71
Tabla 10	Resultados del RMSE	81

## LISTA DE FÓRMULAS

Fórmula nº1:	Teoría Ondulatoria	15
Fórmula nº2:	Teoría Cuántica	15
Fórmula nº3:	Ley de Planck	17
Fórmula nº4:	Ley de Stefan-Boltzmann	18
Fórmula nº5:	Ley de Wien	18
Fórmula nº6:	Correcciones geométricas	36
Fórmula nº7:	Matriz de covarianzas	42
Fórmula nº8:	Matriz de covarianzas	42
Fórmula nº9:	Matriz de covarianzas	42
Fórmula nº10:	Matriz de covarianzas	42
Fórmula nº11:	Matriz de correlación	43
Fórmula nº12:	Correlación lineal de Pearson	43
Fórmula nº13:	Fusión IHS	44
Fórmula nº14:	Proceso inverso IHS a RGB	45
Fórmula nº15:	Fusión mediante IHS forma matricial	45
Fórmula nº16:	FIHS (Fast IHS)	46
Fórmula nº17:	FIHS (Fast IHS simplificación)	46
Fórmula nº18:	FIHS SRF	47
Fórmula nº19:	Intensidad nueva (I')	47
Fórmula nº20:	Fusión de Brovey	48
Fórmula nº21:	Fusión de Brovey expresión del denominador	48
Fórmula nº22:	Transformada de Wavelet: Algoritmo de Átrous	52
Fórmula nº23:	Algoritmo de fusión MDMR	53
Fórmula nº24:	Ecuación general de una Elipse	54
Fórmula nº25:	Filtro direccional	54
Fórmula nº26:	Lakshmanan demostró	54
Fórmula nº27:	Algoritmo de fusión de Átrous	55
Fórmula nº28:	Coeficiente de correlación	57
Fórmula nº29:	RMSE	57
Fórmula nº30:	Laplaciano Zhou	58
Fórmula nº31:	Índice Zhou	58
Fórmula nº32:	RMSE Ergas Espectral	59
Fórmula nº33:	Ergas Espectral	59





Fórmula n°34:	RMSE Ergas Espacial	59
Fórmula n°35:	Ergas Espacial	59
Fórmula n°36:	Ergas Promedio	60
Fórmula n°37:	Diferencia de Ergas	60
Fórmula n°38:	Índice QU	61
Fórmula n°39:	Índice QU como producto de 3 términos	61
Fórmula n°40:	QU de los índices parciales	61
Fórmula n°41:	Índice Q4	62
Fórmula n°42:	Índice Q4 como producto de 3 términos	62
Fórmula n°43:	NDVI	64
Fórmula n°44:	Vectores multitemporales	65
Fórmula n°45:	Vectores multitemporales (vector de cambio)	65
Fórmula n°46:	Matriz correlación	78
Fórmula n°47:	Matriz covarianza	79
Fórmula n°48:	Ecuación de la recta de regresión	79
Fórmula n°49:	Ecuaciones de los parámetros a y b	79
Fórmula n°50:	Ecuación del RMSE	80
Fórmula n°51:	Ecuación Deltacue	82



## Capítulo 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO.

### 1.1 ANTECEDENTES GENERALES.

La década de los años 60 marca el inicio del desarrollo de las observaciones terrestres realizadas desde el espacio mediante los satélites artificiales.

Anteriormente, las técnicas de teledetección se basaban exclusivamente en la fotografía aérea, realizándose por primera vez, desde globos cautivos durante la guerra civil americana, aunque su mayor auge surge en la I Guerra Mundial con los reconocimientos llevados a cabo por la aviación.

Posteriormente, con la II Guerra Mundial aparece otra técnica de observación a distancia, el radar.

La fotografía espacial comenzó en 1946 en EEUU, con fotos tomadas a bordo del cohete V-2, y aun dentro de la atmósfera, éstas no dieron muy buenos resultados. Es en Octubre de 1957 cuando se lanza al espacio el primer satélite artificial soviético SPUTNIK 1, y en 1959, la primera foto espacial de la tierra transmitida por el Explorer-6.

En la década de los 60 es cuando la NASA pone en marcha los primeros programas. Así en 1960, se lanza el primer satélite meteorológico TIROS-1 que obtuvo 23.000 imágenes de diferentes lugares del planeta. Le siguen distintas misiones o proyectos espaciales al margen de las que se conciben con fines militares. Destacan en 1964, el proyecto MERCURY, que proporcionó varios cientos de fotos en color, y las misiones GEMINI y APOLO (1965-69).

Ya en la década siguiente, el proyecto SKYLAB (1973-79) con una misión no tripulada y tres sí, proporcionó un volumen considerable de fotografías, imágenes y otros datos.

Todas las misiones mostraron la utilidad de las fotografías espaciales e imágenes para el análisis de los recursos terrestres. Este reconocimiento condujo al establecimiento en 1966 del programa EROS, que se materializó en el desarrollo y fue puesta en órbita.

En 1972 se lanzó el primer satélite específicamente dedicado al estudio de recursos naturales de la tierra, el ERTS-1. Con este satélite, posteriormente rebautizado con el nombre de Landsat 1, comienza la serie de satélites Landsat que, desde entonces, proporcionan una observación continua de toda la superficie terrestre desde el espacio.

### 1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO.

Este trabajo consiste en la combinación de una imagen multiespectral de baja resolución espacial con una imagen pancromática de alta resolución, con objeto de obtener una imagen resultante con la información espectral de la primera y el detalle espacial de la segunda.

Tiene por objetivo analizar las capacidades de las imágenes de satélite para la actualización cartográfica. Para ello, se evaluará en qué medida las imágenes adquiridas en modos pancromáticos y multiespectral pueden ser utilizadas para optimizar el proceso de actualización.

Se centrará en los diferentes métodos de integración, analizando cada uno de ellos, y así, llegar a un estudio comparativo. El método que nos aporte mejor resolución, es el que utilizaremos para nuestra actualización cartográfica.

### 1.3 FUNDAMENTOS DE LA TELEDETECCIÓN.

#### 1.3.1 Concepto de Teledetección.

El vocablo teledetección deriva de la traducción dada por los franceses “teledetección” en la adquisición de información sobre un objeto a distancia; esto se realiza, sin que exista contacto material entre el objeto o sistema observado y el observador. Un ejemplo de sensor remoto es el ojo, pues nos permite obtener información de nuestro entorno sin necesidad de tocarlo.

No existe una definición única universalmente aceptada, ya que cada autor utiliza la suya. Pero podemos decir que la teledetección parte del principio físico de la existencia de una perturbación (energía electromagnética, ondas de presión, campos gravitacionales) en el que el sistema observado se produce en el medio, transmitiéndose al sistema receptor para ser registrada, almacenada y posteriormente interpretada. Así, en un sentido amplio, la teledetección incluye varias técnicas como puede ser el sonar, la ecografía, etc. Sin embargo, la radiación electromagnética es el medio más usado en teledetección.

Ya que nuestro contenido no es dar una definición única, podemos concluir diciendo que las definiciones más habituales incluyen los siguientes aspectos:

- La adquisición de información sin entrar en contacto material con el objeto.
- Sensores localizados en plataformas de observación.
- Las regiones del espectro electromagnético.
- Y la transformación de los datos obtenidos en información útil por medio de técnicas de interpretación y reconocimiento de las superficies.

Desde el punto de vista de su aplicación, la teledetección tiene como objetivo “el reconocimiento de las características de la superficie terrestre y de fenómenos que en ella se producen a partir de los datos registrados por el sensor”. Por ello, son muchas y diferentes las disciplinas (geografía, geología, meteorología, oceanografía...) que sirven de esta fuente de información.

El principal reto con que se enfrenta la teledetección es la transformación de datos registrados por el sistema receptor en magnitudes físicas y por ello, información útil al usuario. En este campo tienen cavidad especialistas de diferentes disciplinas ya sea bien físicos, ingenieros, matemáticos, estadísticos, informáticos, geógrafos, geólogos, meteorólogos, etc.

Dar respuesta a la cuestión ¿Qué es la teledetección? Nos conduce, quizá al punto de plantearnos si se trata de una técnica, ciencia, arte, o simplemente una fuente de información. La respuesta probablemente sea personal y está en función de la parcela de la disciplina en el que cada cual trabaje.

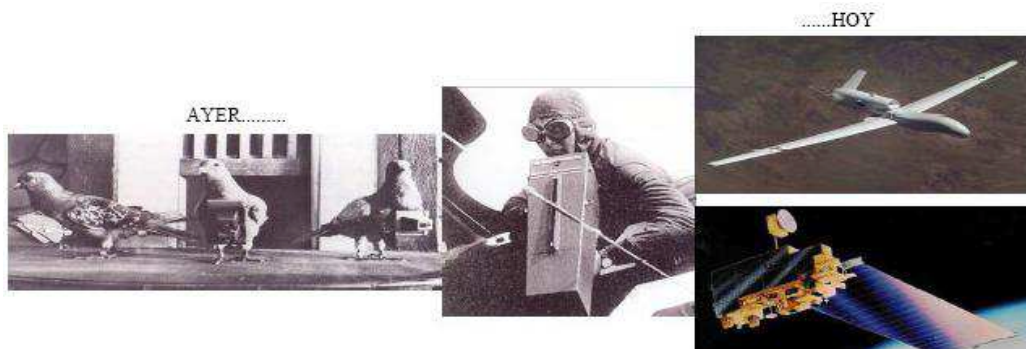


Fig. 1.1 Etapas de la teledetección (Fuente: imágenes Google)

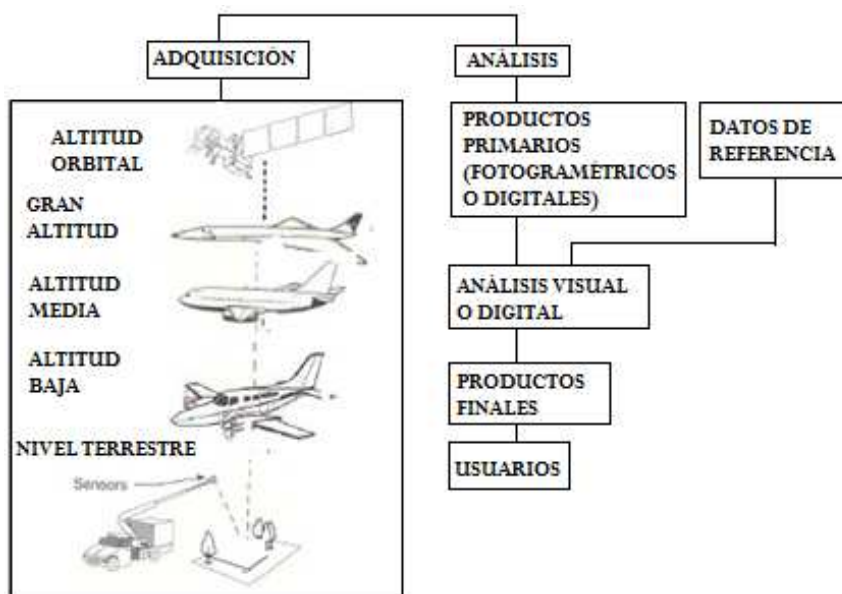


Fig. 1.2 Evolución de la teledetección (Fuente: imágenes Google)

### 1.3.2 Cobertura global y sinóptica.

Los sensores ubicados en plataformas espaciales cubren prácticamente la totalidad de la superficie del planeta proporcionando datos sobre zonas remotas y de difícil acceso, océanos y regiones cubiertas de hielo donde, de no ser por esta técnica, la información sería difícil de conseguir.

Además, en comparación con los registros puntuales obtenidos tradicionalmente (estaciones meteorológicas, campañas oceanográficas, aforos, muestreos de campo...) las imágenes espaciales obtienen información sobre extensas aéreas del planeta casi de forma instantánea, siendo así fácilmente comparable. Una escena Landsat de 185km por 185km, por ejemplo, tarda en registrarse algo menos de 30 segundos.

La visión sinóptica de amplias zonas del planeta permite la observación de fenómenos (relieve, estructuras geológicas, dinámica litoral y marina, distribución de coberturas de suelo) que no sería identificables trabajando a escalas más pequeñas. Estas ventajas son válidas tanto para territorios geográficamente amplios como para pequeñas aéreas de varios kilómetros cuadrados, dado que se dispone cada día de más imágenes de alta resolución.

### 1.3.3 Frecuencia temporal y actualización de datos.

Una vez puesta en órbita la plataforma espacial, los satélites registran datos de forma continua con una alta repetitividad. La frecuencia temporal permite el estudio de fenómenos dinámicos y la detección o el análisis de cambios en el paisaje como incendios, inundaciones, desertificación, cambios en los usos del suelo, evolución de cultivos, etc. Así, como la actualización continua de la cartografía existente.



Del mismo modo, la disponibilidad de series temporales largas de imágenes de satélites como el Landsat hace posible la realización de estudios estáticos o la utilización de las imágenes como documento objetivo del pasado.

El valor temporal de las imágenes cobra cada día más valor entre las singularidades que ofrece la teledetección espacial. Los archivos de imágenes pueden ser consultados desde distintos lugares gracias al crecimiento de los sistemas de información y al desarrollo de internet, mejorando considerablemente el acceso al usuario.

### **1.3.4 Homogeneidad de datos.**

Los datos tomados por un sensor en toda la Tierra son datos espacialmente consistentes, es decir, registrados por un mismo instrumento, mientras que los datos tomados sobre el terreno a menudo proceden de sistemas de medición diferentes y no siempre son comparables. La homogeneidad de los datos tiene gran valor para la cartografía de zonas amplias y para los estudios de evolución que tratan series temporales largas.

### **1.3.5 Formato digital.**

Por lo general, las imágenes de satélite llegan al usuario en formato digital. Los sensores, proporcionan datos digitales preparados para el tratamiento informático. En realidad, no es posible tratarlos de otra manera.

El formato digital nos proporciona enormes ventajas en cuanto a la integración de los datos con otras fuentes de información (fotografía aérea, mapas temáticos, modelos digitales de elevación, bases estadísticas alfanuméricas) en los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Además, el tratamiento digital de las imágenes conlleva las siguientes ventajas: agiliza el proceso de visualización e interpretación, permite la extracción de información referente a pequeñas zonas, la creación de mosaicos en zonas amplias, y facilita la génesis de modelos cuantitativos que integran los datos de satélite con otras variables medioambientales.

Como contrapartida, se requiere la disponibilidad de sistemas informáticos potentes capaces de manipular el volumen de datos que suponen las imágenes multiespectrales e hiperespectrales. En los últimos años, la generalización y democratización del mundo de la informática ha llevado a cabo la difusión de softwares específicos fácilmente manejable por un usuario no experto que garantiza el acceso de información a un amplio rango de profesiones.

## 1.4 COMPONENTES DEL SISTEMA DE TELEDETECCIÓN.

Los elementos básicos que influyen en la teledetección son:

*Fuente de Energía.* Representa de donde proviene la radiación electromagnética que es captada por el sensor; provenientes desde un foco exterior al sensor (sol), o emitida por el mismo.

*Superficie Terrestre.* Corresponde a todas las coberturas que se encuentran en la superficie terrestre, vegetación, agua, construcciones humanas, etc. Que absorben y reflejan la señal energética sus propias características físicas.

*Sistema sensor.* Compuesto por el sensor y la plataforma satelital en que se encuentra; es el que recibe la información de las cubiertas, las codifica, las almacena y posteriormente las envía al Sistema de Recepción.

*Sistema de Recepción.* Recibe y graba la información emitida por el satélite, realizando algunas correcciones y las distribuye.

*Intérprete.* Convierte la información según las necesidades propias, mediante tratamiento visual y digital, para el estudio que esté realizando.

*Usuario Final.* Es a quién finalmente va dirigido el estudio y trabajo.

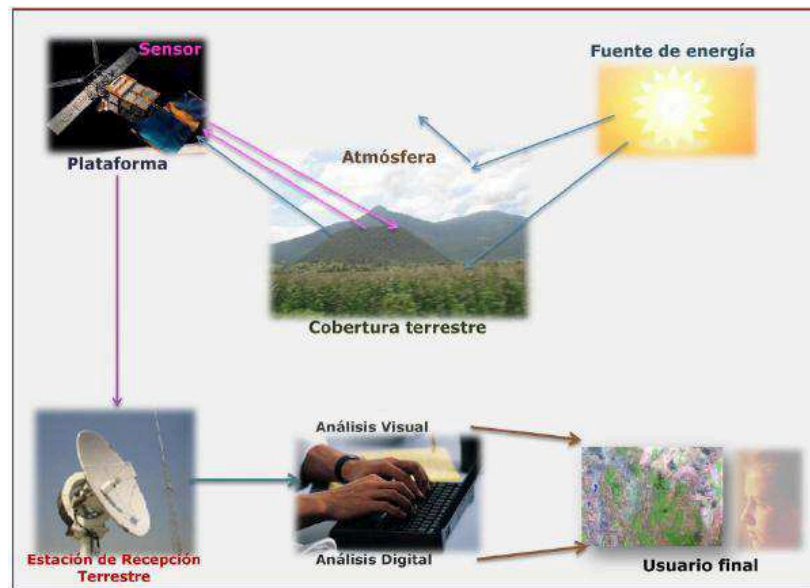


Fig. 1.3 Componentes del sistema de teledetección (Fuente: imágenes Google)





## 1.5 FUNDAMENTOS FÍSICOS.

### 1.5.1 Fundamentos de observación remota.

Anteriormente se definió la teledetección como aquella técnica que nos permite obtener información a distancia de los objetos situados sobre la superficie terrestre.

Para que esta observación remota sea posible es preciso que entre los objetos y el sensor exista algún tipo de interacción. Nuestros sentidos perciben un objeto sólo cuando pueden descifrar la información que este les envía.

Por ejemplo, somos capaces de ver un árbol porque nuestros ojos reciben y traducen convenientemente una energía luminosa procedente del mismo. Esa señal, además, no es originada por el árbol, sino por un foco energético exterior que lo ilumina. De ahí que no seamos capaces de percibir ese árbol en plena oscuridad.

Este sencillo ejemplo nos sirve para introducir los tres principales elementos de cualquier sistema de teledetección: sensor (nuestro ojo), objeto observado (árbol) y flujo energético que los pone en relación y permite detectar el objeto.

En nuestro ejemplo, ese flujo procede del árbol por reflexión de la luz solar. Podría también tratarse de un tipo de energía emitida por el propio objeto (en caso de que fuéramos capaces de detectar el calor que emite), o incluso por el sensor (por ejemplo, si tuviéramos una cámara equipada con flash).

Éstas son, precisamente, las tres formas de adquirir información a partir de un sensor remoto: por reflexión, por emisión y por emisión-reflexión.

- *Reflexión.* Es la más importante de teledetección, pues se deriva directamente de la luz solar, principal fuente de energía de nuestro planeta. El sol ilumina la superficie terrestre, que refleja esa energía en función del tipo de cubierta presente sobre ella.
- *Emisión.* El sensor es capaz de captar la energía emitida por las propias cubiertas.
- *Emisión-Reflexión.* El sensor genera su propio haz de energía, que posteriormente recoge la reflexión producida por el mismo.

En cualquiera de estos casos, ese flujo energético entre el sensor y cubierta se le llama radiación electro-magnética.

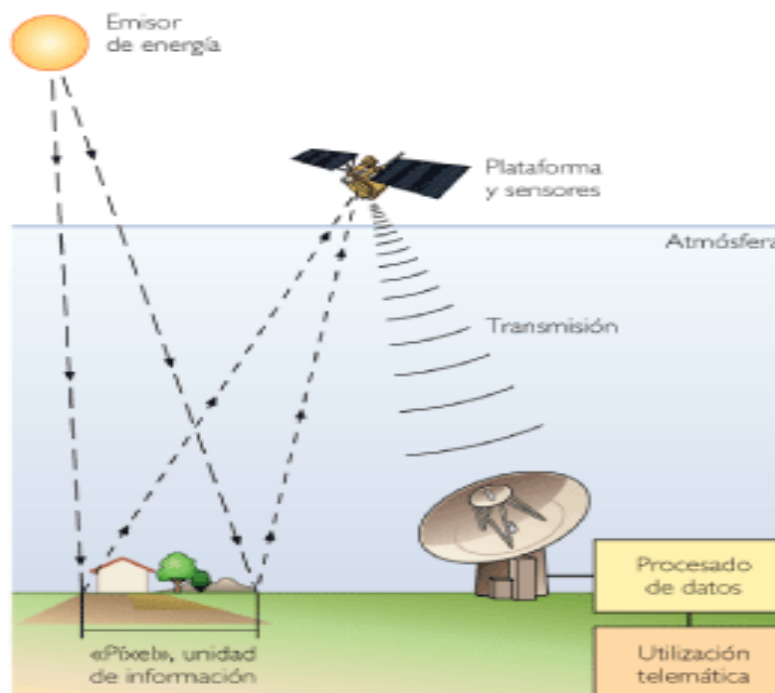


Fig. 1.4 Observación remota (Fuente: imágenes google)

### 1.5.2 Radiación Electromagnética.

La energía se transfiere de un cuerpo a otro por tres procesos: *convección*, *conducción* y *radiación*. Siendo esta última la más importante y la cual definiremos a continuación.

Históricamente, las propiedades de la radiación electromagnética se han explicado por dos teorías aparentemente contrapuestas: aquella que la concibe como un haz ondulatorio, y aquella otra que la considera como una sucesión de unidades discretas de energía, fotones o cuantos, con masa igual a cero. Actualmente, parece que las dos teorías se pueden compaginar, pues se ha demostrado que la luz presenta compartimentos que pueden explicarse de acuerdo a ambos planteamientos.

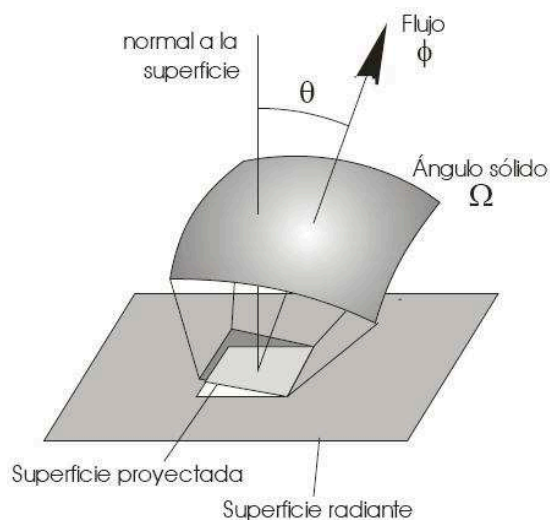


Fig. 1.5 Radiación electromagnética (Fuente: imágenes Google)



Según la **teoría ondulatoria**, la energía electromagnética se transmite de un lugar a otro siguiendo un modelo armónico y continuo, a la velocidad de la luz y conteniendo dos campos de fuerzas ortogonales entre sí: eléctrico y magnético. Las características de este flujo energético pueden describirse por dos elementos: longitud de onda y frecuencia. La primera hace referencia a la distancia entre dos picos sucesivos de una onda, mientras que la frecuencia designa el número de ciclos pasando por un punto fijo en una unidad de tiempo. Ambos elementos están inversamente relacionados.

$$C = \lambda \times F \quad (\text{Fórmula n}^\circ 1)$$

Donde:

C = velocidad de la luz ( $3 \times 10^8$  m/s)

$\lambda$  = Longitud de onda ( $\mu\text{m}$  micrómetros)

F = Frecuencia (Hz)

Según la **Teoría Cuántica**. Todo cuerpo radiante emite energía electro-magnética de forma discreta y no continua. A mayor longitud de onda o menor frecuencia, el contenido energético será menor y viceversa.

$$Q = h \times F \quad (\text{Fórmula n}^\circ 2)$$

Donde:

Q = Energía Radiante (julios)

F = Frecuencia (Hz)

h = Constante de Planck ( $6.6 \times 10^{-34}$  Js)

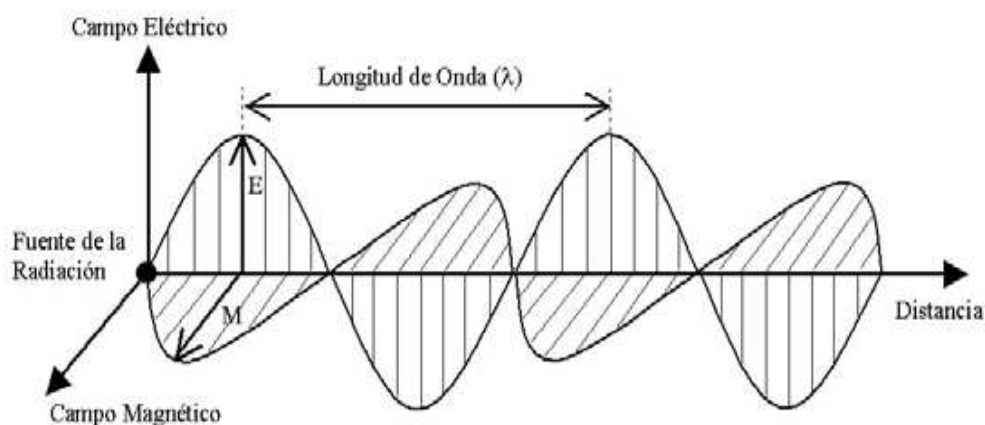


Fig. 1.6 Campo electromagnético (Fuente: PDF, Actualización Cartográfica con imágenes satelitales, Mauricio Alfredo y Gonzalo Ortega)

### 1.5.3 Espectro Electromagnético.

“De las fórmulas anteriores, se deduce que se puede definir cualquier tipo de energía radiante en función de su longitud de onda o frecuencia.” Aunque la sucesión de valores de longitud de onda es continua, suelen establecerse una serie de bandas en donde la radiación electro-magnética manifiesta un comportamiento similar. La organización de estas bandas de longitudes de onda o frecuencia se denomina espectro electro-magnético”.

El espectro electromagnético se divide en regiones de longitudes de onda; estas regiones denominadas bandas, tienen sus propias frecuencias medidas en Hertz y longitudes de ondas que van desde los micrómetros hasta los kilómetros.

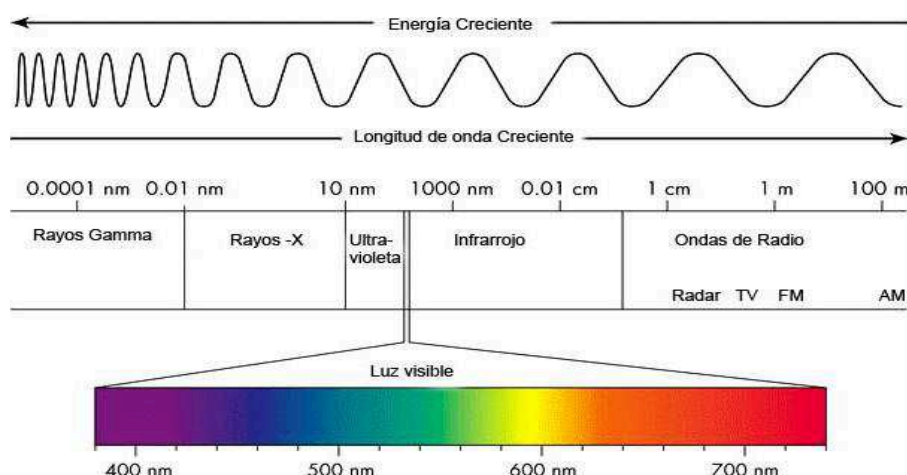


Fig. 1.7 Espectro electromagnético (Fuente: imágenes Google)

A continuación, se muestra un esquema del espectro electromagnético que representa las características de cada región espectral.

Región Espectral (bandas)	Longitud de onda ( $\lambda$ )	Características
Rayos Gamma	< 0,03 nm	Radiación completamente absorbida por las capas superiores de la atmósfera. No se usa en teledetección
Rayos X	0,03 - 30 nm	Radiación completamente absorbida por la atmósfera. No se usa en teledetección
Ultravioleta	0,03 - 04 $\mu$ m	La radiación con $\lambda < 0,3 \mu$ m es completamente absorbida por la capa de ozono
Visible (azul, verde y rojo)	0,4 - 0,7 $\mu$ m	Se puede detectar a través de fotodetectores y películas fotosensibles normales (color y B/N).
Infrarrojo Próximo	0,7 - 1,3 $\mu$ m	Discrimina masas vegetales y concentraciones de humedad.
Infrarrojo Medio	1,3 - 8 $\mu$ m	Estima contenido de humedad en la vegetación y detección de focos de alta temperatura.
Infrarrojo Térmico	8 - 14 $\mu$ m	detecta el calor proveniente de la mayor parte de la cubierta terrestre
Micro-Ondas	0,1 - 100 cm	Radiación de grandes longitudes de onda, capaces de penetrar nubes, nieblas y lluvia
Ondas de Radio	> 100 cm	Radiación con las mayores longitudes de onda del espectro. Usadas en telecomunicaciones

Tabla 1 Características de la región espectral (Fuente: PDF, Actualización Cartográfica con imágenes satelitales, Mauricio Alfredo y Gonzalo Ortega)

### 1.5.4 Radiación de cuerpo negro.

Considerando una cavidad aislada que se mantiene a temperatura constante, de acuerdo con el segundo principio de la termodinámica no puede haber ninguna diferencia de temperatura, composición o presión en el interior de la misma ya que si apareciera, el sistema evolucionaría hasta anular tal diferencia y, por tanto, llegaríamos de nuevo a una situación de equilibrio termodinámico. En esta cavidad existe un campo de radiación que se caracteriza por ser:

- Isótropo y no polarizado
- Independiente de la naturaleza y forma de las paredes de cavidad
- Dependiente sólo de la temperatura

En estas condiciones la radiación recibe el nombre de radiación de cuerpo negro.

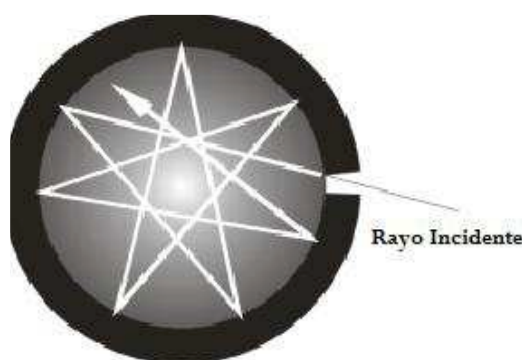


Fig. 1.8 Radiación en un cuerpo negro (Fuente: imágenes Google)

### 1.5.5 Leyes fundamentales de la radiación.

#### Ley de Planck:

Max Planck fue quien en 1900, abandonando una de las ideas fundamentales de la teoría electromagnética clásica, propuso un modelo según el cual, para cada uno de los osciladores elementales que componen la materia, su energía es proporcional a su frecuencia, siendo esta un múltiplo entero de cantidad  $h\nu$ , donde  $h$  es conocida como la constante de Planck. Este postulado supuso el primer paso hacia el desarrollo de la física cuántica, basándose en esta consideración, Planck obtuvo la fórmula que proporcionaba correctamente la distribución de la energía radiante en función de la longitud de onda.

$$E_{\lambda,T} = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right)} - 1} \quad (\text{Fórmula n}^\circ 3)$$

#### Ley de Kirchhoff:

Generalmente una fuente de radiación está rodeada por otras, de modo que además de comportarse como un emisor de radiación también se comporta como un receptor. Su temperatura varía en función de la magnitud de las energías emitida y absorbida.

Se dice que existe equilibrio de radiación si estas son iguales, independientemente de la longitud de onda considerada.

Si se introduce un cuerpo en una cavidad de radiación en la que se tiene radiación de cuerpo negro y se deja evolucionar el sistema hasta que quede restablecido en equilibrio a la temperatura, el resultado es equivalente a la modificación de las paredes de la cavidad, de modo que no varía el campo de radiación.

### Ley de Stefan-Boltzmann:

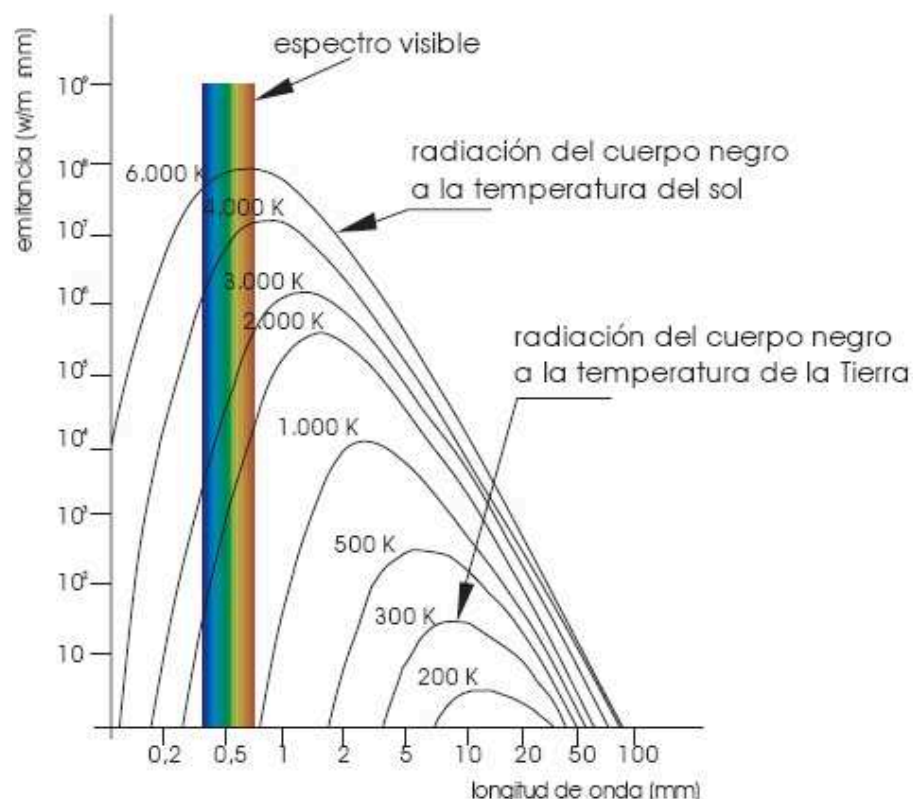
La ley de Stefan-Boltzmann expresa la densidad de energía radiante en el interior de una cavidad de cuerpo negro en términos de temperatura. Esta ley puede obtenerse a partir de las consideraciones termodinámicas y establece que el poder emisor total del cuerpo negro, tanto sin consideración de su distribución espectral, es una función de la cuarta potencia de la temperatura del citado cuerpo.

$$E = \sigma T^4 \quad (\text{Fórmula n}^\circ 4)$$

### Ley del Desplazamiento de Wien:

Indica la dependencia en la temperatura absoluta que tiene la longitud de onda para la cual se encuentra el máximo de emisión de un cuerpo negro.

$$\lambda_{\max}(\mu\text{m}) = 0.214 \frac{hc}{kT} = \frac{2898(\mu\text{mK})}{T(K)} \quad (\text{Fórmula n}^\circ 5)$$





Temperatura (K)	% IR	% VIS	% UV
1.000	99,999	$7,367 \cdot 10^{-4}$	$3,258 \cdot 10^{-11}$
2.000	98,593	1,406	$7,400 \cdot 10^{-4}$
3.000	88,393	11,476	0,131
4.000	71,776	26,817	1,407
5.000	55,705	39,166	5,129
6.000	42,661	45,732	11,607
7.000	32,852	47,506	19,641
8.000	25,565	46,210	28,224
9.000	20,154	43,247	36,599
10.000	16,091	39,567	44,342

Tabla 2 Valores de K (Fuente: [www.ujaen.es](http://www.ujaen.es))

### 1.5.6 Procesos de iteración de la radiación electromagnética con la materia.

La radiación electromagnética, al atravesar un medio material, se ve atenuada por los procesos de absorción y dispersión. En el caso particular de la atmósfera, estos procesos encuentran su origen en la iteración de la radiación electromagnética con las moléculas y partículas que la componen.

La absorción se define como la transformación energética sufrida por la radiación cuando atraviesa el medio. Como resultado de la misma, hay una alteración neta de los niveles energéticos de las moléculas. En cambio, la dispersión determina el cambio de dirección de una parte de la radiación incidente respecto a la que llevaba originalmente.

Habitualmente se emplea el término extinción para hacer referencia a la acción combinada de absorción y dispersión.

## 1.6 CARACTERÍSTICAS ESPECTRALES DEL SUELO.

La observación de la reflectancia del suelo en el visible y en los infrarrojos próximos y medio es importante, al menos por dos razones. En primer lugar, la extensa presencia del suelo sobre la superficie terrestre con la excepción de las superficies cubiertas por hielo, nieve y materiales artificiales, ya que el suelo intercepta gran parte de la radiación electromagnética procedente del sol.

Una segunda razón para el estudio de las propiedades reflectantes es de tipo edafológico. La edafología es el estudio de los suelos considerados como resultado de procesos de alteración y condicionados por el tipo de roca madre, el clima, la geomorfología, la actividad biológica y el tiempo de evolución. También incluye la descripción, caracterización cuantitativa, clasificación y cartografiado de suelos.

La reflectancia del suelo, puede proporcionar información de las propiedades y el estado del suelo. La aplicación más familiar del anterior concepto es la observación del color del suelo para describir y ayudar a clasificar suelos.



### 1.6.1 Composición y propiedades físicas.

#### □ Generalidades.

Los principales componentes del suelo son los sólidos inorgánicos, la materia orgánica, el aire y el agua. El componente inorgánico contiene fundamentalmente minerales cristalinos, pero también pueden presentar sustancias no cristalinas.

La materia orgánica consta de raíces, restos vegetales y organismos vivos del suelo. Los espacios vacíos entre los materiales sólidos son ocupados por aire y por agua, en proporción variable, dependiendo de las características del suelo y de su estado.

#### □ Los minerales del suelo.

Los minerales del suelo se derivan de la transformación de la roca madre.

Estos se clasifican en primarios y secundarios, dependiendo del origen. Los primarios son, originariamente, componentes de las rocas ígneas y metamórficas y se forman a presiones y temperaturas muy superiores a las encontradas en la superficie terrestre. Los secundarios se forman como consecuencia de la alteración química de los minerales primarios.

Por otra parte, los edafólogos clasifican los minerales del suelo según el tamaño de partícula de la siguiente forma:

Arena gruesa: 2 a 0.2 mm.

Arena fina: 0.2 a 0.02 mm.

Limo: 0.02 a 0.002 mm.

Arcilla: < 0.002 mm.

La arena y el limo están constituidos, fundamentalmente por minerales primarios y, en general, principalmente de cuarzo, debido a la gran resistencia a la alteración química.

Otros minerales primarios son los feldespatos (ortoclasa y plagioclasas), micas (moscovita, biotita) y silicatos ferromagnésicos (anfíbol, piroxeno y olivino).

Los secundarios se producen o bien por alteración química de los mismos o por recristalización de los productos de descomposición.

Destacan los minerales de arcilla y óxidos e hidróxidos de hierro, aluminio, silicio y titanio. Produciéndose también carbonatos, sulfatos y fosfatos.

#### □ La materia orgánica.

La materia orgánica del suelo procede de la descomposición de restos de plantas y animales, de sustancias derivadas de los productos de descomposición, de microorganismos y de pequeños animales que viven en el suelo. Todas estas sustancias se clasifican, bien como humus o como sustancias no húmicas.

#### □ El aire y el agua del suelo.

Los espacios vacíos que quedan entre las partículas y entre los agregados sólidos del suelo son ocupados por aire y agua en proporciones variables. El agua del suelo es una solución que contiene cierta concentración de sustancias solubles en equilibrio con la fase sólida. El aire del suelo tiene una composición que difiere de la atmosférica fundamentalmente por su mayor concentración de anhídrido carbónico y menor concentración de oxígeno, fundamentalmente como resultado de la actividad biológica de la raíces y de los microorganismos.





#### ❑ Textura y estructura.

La textura de un suelo tiene gran importancia sobre ciertas propiedades del mismo tales como su aptitud para el laboreo, su fertilidad sus características hidráulicas y, particularmente, su reflectancia. Por ejemplo, los suelos arenosos suelen tener colores más claros que los arcillosos.

En lo que se refiere a la estructura, la formación de agregados generalmente aumenta la porosidad y permite una mayor aireación y capacidad de drenaje del suelo.

#### ❑ Color.

El color es uno de los más sencillos y útiles atributos para la determinación de las diferencias entre suelos y para describir las características del perfil. La reflectancia en el intervalo del visible, o color, es una característica diferencial para muchas clases en los modernos sistemas de clasificación de suelos tanto para las características superficiales como para caracterizar los horizontes de diagnóstico.

Para la determinación del color, los edafólogos realizan una comparación directa con ciertos patrones de color estandarizados tales como los que constituyen la carta Munsell (Munsell Book of Color, 1947)

### 1.6.2 Influencia del estado superficial del suelo.

#### ❑ Rugosidad.

El estado de rugosidad de la superficie del suelo puede afectar de forma importante a la reflectancia del mismo. En general, un aumento de la rugosidad determina una menor reflectancia del suelo, esto es debido, por una parte al aumento de la componente de dispersión de la radiación en detrimento de la radiación reflejada especularmente y por otra por el aumento de la sombra de las propias partículas.

La reflectancia depende del ángulo de elevación solar (la hora del día, la estación del año y del ángulo de iluminación). Cuanto mayor es la elevación del Sol, menor es la reflectancia; este efecto parece debido a una mayor penetración de la radiación incidente en el interior de los espacios vacíos de la capa superficial.

#### ❑ Cubierta superficial.

La composición espectral de la radiación reflejada por los suelos es muy diferente de la reflejada por las plantas. Por ello, la densidad, morfología, y la distribución geométrica de las hojas de la cubierta vegetal son factores que condicionan la respuesta espectral del suelo subyacente.

A pesar de que una cubierta vegetal densa enmascare la respuesta del suelo, las características vegetativas de la cubierta vegetal se encuentran determinadas por las propiedades del suelo subyacente y el estado del mismo, por lo que puede realizarse una estimación indirecta de las citadas propiedades.

Además de vegetación viva, y sobre todo en suelos cultivados, aparecen restos de cosechas o vegetación muerta que también alteran las propiedades reflectantes de los suelos.



## CAPÍTULO 2. SATÉLITES, PLATAFORMAS Y SENSORES.

### PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS.

#### 2.1 SATÉLITES DE OBSERVACIÓN.

Desde los años 70 se han desarrollado diversos tipos de sensores y plataformas receptoras, aumentando su resolución radiométrica, espacial y temporal a medida que las tecnologías han ido avanzando.

En la actualidad se dispone de una amplia variedad de sensores diseñados para tareas específicas, que van desde la exploración del Cosmos a los estudios climatológicos, oceánicos o medioambientales. Los satélites artificiales son la mejor plataforma de observación sobre la que instalar los sensores que captan la energía reflejada o emitida por la Tierra.

Estos satélites se clasifican en tres grandes grupos en función de sus características orbitales:

- *Satélites geoestacionarios o geosincrónicos.*

En ellos, el período orbital, es decir, el tiempo que tarda en completar una órbita alrededor del planeta, es igual a la velocidad de rotación de la Tierra, por lo que aparecen como inmóviles, siempre en la misma posición respecto a un punto fijo de la superficie terrestre.

La altura orbital de estos satélites es de unas 5 o 6 veces el radio terrestre y sus sensores se caracterizan por su baja resolución espacial y la alta repetitividad de sus observaciones (varias veces al día). Como ejemplo de satélites geoestacionarios podemos citar el programa norteamericano GOES y el europeo METEOSAT, que realiza una observación de la Tierra cada 30 minutos. Su principal sensor es un radiómetro multiespectral que trabaja en regiones del visible y del infrarrojo.

- *Satélites de órbita polar o heliosincrónicos.*

Estos satélites no permanecen sobre un mismo punto de la superficie terrestre, sino que describen órbitas circulares o ligeramente excéntricas, con dirección Norte-Sur, mientras que la Tierra gira bajo ellos en sentido Oeste-Este.

Suelen tener una altura orbital menor de 1000 Km. La relación angular entre el Sol y el plano orbital del satélite se mantiene constante, por lo que el satélite pasa sobre el mismo punto de la Tierra a la misma hora solar. La zona de la superficie terrestre que puede ser captada por el satélite viene limitada por su inclinación orbital, es decir, para que un satélite de órbita polar pudiera sobrevolar la totalidad de la superficie terrestre, debería tener una inclinación orbital de 90°.

Como ejemplos de satélites de órbita polar tenemos los programas SPOT, NOAA y LANDSAT.



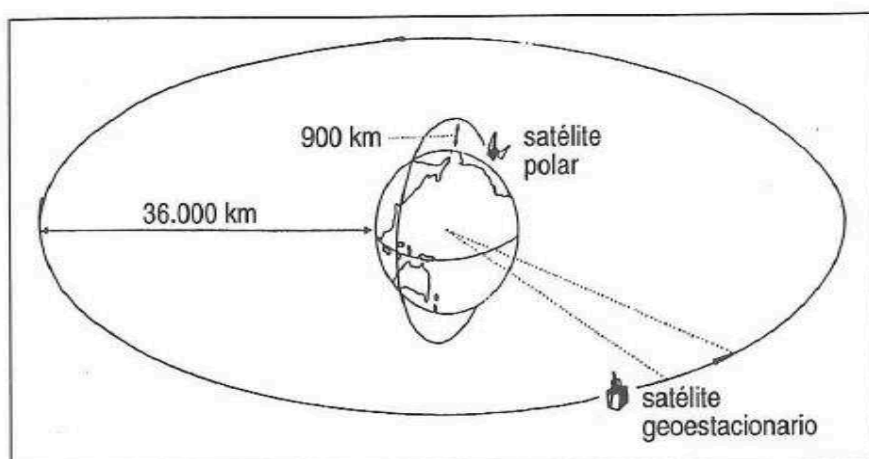


Fig. 2.1 Satélites de órbita polar y satélites geoestacionarios (Fuente: PDF, Teledetección y sus bases; Santiago Castaño, José Ruiz y Alicia Vela)

- *Satélites de órbita general*

No presentan órbita geosincrónica ni heliosincrónica. Como ejemplo de este tipo de satélites tenemos los programas: SEASAT, satélite lanzado por los EEUU y dedicado al estudio de los fondos oceánicos, que ya ha desaparecido; y ERS-1 primer satélite europeo de teledetección que presenta una órbita casi polar y circular, a una altura de 780 Km, con un período orbital de 3 días.

## 2.2 SENSORES.

Para que la teledetección pueda llevarse a cabo, es necesario contar con instrumentos capaces de registrar la radiación procedente de la Tierra (sensores) y de transformarla en una señal susceptible de ser manejada de forma analógica con productos fotográficos o de forma digital con cintas magnéticas compatibles, con ordenador, CCTs, CD Rom, etc.

Los sensores pueden definirse como instrumentos susceptibles de detectar la señal electromagnética (radiación reflejada o emitida) que les llega de la Tierra y la atmósfera, en un determinado intervalo de longitud de onda, y convertirla en una magnitud física que pueda ser tratada y grabada (señal analógica o digital).

Para llevar a cabo la observación del terreno, los sensores se ubican en plataformas fijas o móviles como mástiles, grúas, globos, aviones, cohetes o satélites. Las características de la imagen registrada dependen en gran medida de las propiedades del sensor utilizado y de la distancia al suelo desde la cual se realiza la adquisición de datos.

### 2.2.1 Tipos de Sensores

Atendiendo al origen de la señal captada y al mismo tiempo a las técnicas de teledetección, los sensores se pueden clasificar en dos grupos: métodos pasivos y métodos activos.

Los *métodos pasivos* se basan en la detección de las características radiactivas o reflectantes del sistema observado, es decir, el sensor cumple la misión de registrar la radiación emitida por el sistema observado o la radiación solar reflejada. Son sensores pasivos los sensores fotográficos (cámaras fotográficas), los sensores óptico-electrónicos (exploradores de barrido y empuje, y las cámaras vidicon), y los sensores de antena (radiómetros de micro-ondas).



Los **métodos activos** son aquellos en los que el sensor cumple una doble función ya que actúa activamente produciendo una señal (onda electromagnética) de características conocidas que posteriormente registrará después de interactuar con el sistema observado. La información obtenida procede de la comparación entre la señal emitida y la señal reflejada. Son sensores activos el radar (radiómetro activo de micro-ondas), que puede trabajar en cualquier condición atmosférica y el lidar.

Si tenemos en cuenta la región del espectro electromagnético en que se trabaja, la teledetección y los sensores se pueden agrupar en tres categorías: técnicas en el visible-infrarrojo próximo, técnicas en el infrarrojo térmico y técnicas en las microondas. Los sensores pasivos trabajan en todo el rango espectral, mientras que los sistemas activos trabajan únicamente en el intervalo de las microondas.

Dependiendo de la forma en que se registra la señal, los sensores se agrupan en dos familias: los que permiten una adquisición casi instantánea del conjunto de la escena observada como las cámaras de fotos y las cámaras electromagnéticas de barrido, donde la adquisición de la escena se efectúa instantáneamente sobre un soporte que permite la lectura rápida por barrido de un haz electromagnético (RBV), y los sensores que ofrecen una adquisición secuencial de los elementos de la imagen con los cuales, dato a dato se constituye el conjunto de la escena.

Finalmente, en función de la orientación con la que el sensor capta las imágenes se distingue entre sensores de orientación vertical, que es habitual en satélites de resolución espacial baja (Meteosat) o media (Landsat); de orientación oblicua, típica del radar o de orientación modificable, que aparecen en los sensores de alta resolución permitiendo mantener una elevada resolución tanto espacial como temporal. El sensor es orientado por encargo ya que no se toman imágenes de toda la superficie terrestre de forma sistemática.

#### ❑ Métodos pasivos.

Dentro de este método, encontramos los siguientes sensores:

- Las *cámaras fotográficas* son el sistema tradicional utilizado en la teledetección aérea y en las primeras fases de su desarrollo. La imagen observada se registra en una emulsión química sensible, generalmente, a la radiación visible y del infrarrojo próximo. Su capacidad y limitaciones depende de las propiedades ópticas de las lentes, filtros y de la película utilizada. La configuración más común es de 4 cámaras operando en banda verde, roja, infrarroja y la cuarta con película de color.

- Los *radiómetros multispectrales* son sensores óptico-electrónicos que registran la radiación reflejada y emitida por la superficie terrestre y que se separan en distintas bandas espectrales por medio de prismas, espejos dicróicos o filtros. Adquieren información de la superficie terrestre, a intervalos regulares, de forma que cada medida corresponde a un ángulo de visión denominado IFOV o “campo de visión instantáneo”. La radiación electromagnética es captada por una serie de detectores, sensibles a distintas longitudes de onda, que la transforman en impulsos eléctricos proporcionales a la intensidad de radiación recibida y finalmente en un valor numérico conocido como Nivel Digital (ND). Estos valores numéricos pueden convertirse otra vez a valores conociendo los coeficientes de calibrado.



Los radiómetros pueden ubicarse en plataformas aéreas o espaciales pero funcionan bajo los mismos principios. Existen dos grandes tipos de radiómetros:

-Los *radiómetros de barrido transversal* (cross-track) o por espejo oscilante (across-track-scanners). Dispone de un espejo móvil, que oscila perpendicularmente a la dirección de la trayectoria, permitiendo explorar una franja de terreno a ambos lados de la traza del satélite.

La radiancia recibida por este componente óptico se dirige a una serie de detectores, que la amplifican y convierten a una señal eléctrica. Ésta a su vez, se transforma a un valor numérico que puede almacenarse a bordo o transmitirse a una red de antenas receptoras. La información recibida por estas antenas se graba en soporte magnético para su posterior proceso y distribución a los usuarios.

-Los *radiómetros de empuje* (along-track scanners o pushbroom scanners). Eliminan el espejo oscilante al disponer de una cadena con un gran número de detectores de manera que cubre todo el campo visual del sensor. Se denominan CCD (Charge Couple Devices) scanners a los dispositivos de acoplamiento por carga que utilizan semi-conductores. Los detectores están ligados para actuar como electrodos.

Todo el proceso de fabricación se realiza utilizando micro-electrónica, de forma que un chip de 1.5 cm soporta más de 1000 detectores; y un dispositivo comprende miles de ellos. La cadena de detectores se activa con el movimiento de la plataforma de forma que en cada instante se registra información de una línea completa y a medida que el sensor se desplaza se genera la imagen bidimensional de la superficie terrestre.

Este tipo de radiómetro permite aumentar la resolución espacial y reducir los errores geométricos por la eliminación de la parte móvil, y robusta de los detectores de barrido. Como contrapartida resulta bastante compleja la calibración de todos los sensores al mismo tiempo para que se comporten de forma homogénea. Estos problemas son especialmente graves en el infrarrojo medio y térmico, por lo que únicamente se puede trabajar en el rango espectral del visible-infrarrojo próximo.

En el futuro se dispondrá de sensores capaces de captar toda la imagen, como una matriz bidimensional, reduciendo al mismo tiempo los problemas de tipo geométrico.

- Puesto que las *cámaras convencionales* se usan en misiones de corta duración, necesitamos usar para larga duración; por ello utilizaremos las cámaras de tipo Vidicon, que permiten obtener fotografías en el intervalo espectral entre 0.35 y 1.1 micrones, con gran resolución y sin necesidad de utilizar película. La radiación incidente se recoge en una placa fotoconductora formándose una réplica de la imagen óptica. Tan pronto como la imagen es tomada se registra en una banda magnética o se transmite a una estación receptora y es posible tomar una nueva imagen. Normalmente, la señal analógica creada se transmite a la Tierra en tiempo real.

- Los *radiómetros de microondas* están compuestos por una antena que actúa como elemento receptor y amplificador de la señal de microondas y un detector. En este tipo de sistemas, la resolución espacial es inversamente proporcional al diámetro de la antena y directamente proporcional a la longitud de onda. Además se necesitan tamaños de pixel lo suficientemente grandes para recoger una señal de radiación lo suficientemente amplia. Por tanto la resolución espacial es pequeña y sólo pueden aplicarse en estudios globales.



- Los *espectrómetros de imagen* constituyen una nueva generación de instrumentos cuya misión es obtener imágenes en un gran número de bandas espectrales (entre 64 y 200 bandas a intervalos de 10-20 nm) obteniendo un espectro casi continuo de radiación. Para obtener imágenes de alta resolución espacial se utilizan espectrómetros aerotransportados como el sensor AVIRIS con 210 entre 0.4 y 2.4 micras y 20 metros de resolución espacial.

#### ❑ Métodos activos.

- *El radar* (RADio Detection And Ranging) trabaja en una banda entre 1mm y 1m. Se basan en el principio de que las microondas artificiales enviadas en una dirección determinada chocan con los objetos y son dispersadas. La energía dispersada se recibe, se amplifica y se analiza para determinar la localización y las propiedades de los objetos. Puesto que puede medirse también el tiempo que tarda un pulso de radiación en ir y volver, puede conocerse la distancia recorrida y generar así modelos digitales de elevaciones (aunque con algunos problemas ya que quedan zonas de sombra en áreas abruptas). Debido a su capacidad para trabajar sean cuales sean las condiciones atmosféricas su uso se ha extendido considerablemente, especialmente en zonas con cobertura nubosa persistente.

- *El lidar* (Light Detection And Ranging) se trata de un láser que emite pulsos muy cortos de luz polarizada entre el ultravioleta y el infrarrojo cercano. Esta señal interacciona con las partículas atmosféricas o el suelo, causando su dispersión en función del tipo de elemento encontrado. La energía de retorno se recoge por un telescopio, que a su vez la transmite a través de un filtro óptico a un foto-detector. Esta señal es grabada y almacenada en un ordenador. En función del tiempo y la intensidad de la señal de retorno puede deducirse una información muy significativa sobre el tipo de cubierta presente en la zona de estudio. Por comparación con el radar, la menor longitud de onda utilizada por los sensores lidar permiten mayor detalle en la observación, sin embargo, el láser no puede penetrar capas espesas como las nubes.

## 2.2.2 Cualidades de los sensores.

De entre las cualidades de un sistema sensor, hay que destacar la resolución, que puede definirse como su habilidad para registrar y discriminar información de detalle dependiendo del efecto combinado de sus distintos componentes. La resolución de un sensor implica considerar la calidad de la información aportada en distintos aspectos, por lo que en la práctica se habla de cuatro tipos de resolución: espacial, espectral, radiométrica y temporal.

#### ❑ Resolución espacial.

La resolución espacial de un sensor viene dada por el campo de visión instantánea (IFOV) definido como la sección angular, medida en radianes, observada en un momento dado. No obstante, en la resolución espacial se suele utilizar la distancia sobre el terreno correspondiente a este ángulo. Esta distancia es el tamaño de la mínima unidad de la imagen de la que tenemos información, el tamaño medio del pixel.

Depende de varios factores como son la altura orbital, la velocidad de exploración y el número de detectores. En la actualidad esta resolución varía desde 1 m hasta 5000 m.



Marca el nivel de detalle que ofrece la imagen mostrándonos el tamaño mínimo de los elementos discriminables en la imagen. Cuanto menor es el tamaño del pixel, mejor resolución tiene la imagen y mejor posibilidad de discriminar más objetos. Hay que puntualizar que el tamaño del pixel no siempre establece el umbral de elementos discriminables, sino que hay otros factores como la geometría, el contraste de radiación entre objetos próximos, la claridad de la atmósfera, etc.

#### ❑ Resolución espectral.

La resolución espectral de un sensor expresa su aptitud para separar señales de longitudes de ondas diferentes dependiendo del dispositivo de filtro óptico que separa la radiación incidente en bandas espectrales más o menos amplias. Esta resolución indica el número y la anchura de las bandas espectrales, por ello cuanto mayor sea el número de bandas y más estrechas, mejor será la resolución espectral y mayor la capacidad del sensor para reproducir la respuesta espectral del objeto observado y, en consecuencia, la posibilidad de discriminar unas coberturas u otras.

#### ❑ Resolución radiométrica.

La resolución radiométrica hace referencia a la sensibilidad de un sensor y expresa su aptitud en una banda espectral dada para diferenciar señales electromagnéticas de energía diferente. Viene condicionada por los intervalos de digitalización de la señal. El número máximo de niveles digitales de la imagen suele identificarse con la resolución radiométrica y oscila entre 64, 128, 256 y 1024. Este rango de codificación varía con los distintos sensores.

Cuanto mayor sea el número de niveles mejor es la resolución radiométrica y mejor la información. Para un análisis visual no es importante tener muchos niveles de color ya que el ojo humano difícilmente puede percibir más de 64 tonos de gris, pero cuando se opta por el tratamiento informático, la mejora en la resolución puede ser importante.

#### ❑ Resolución temporal.

La resolución temporal alude a la frecuencia de cobertura que proporciona el sensor, es decir, la periodicidad con que adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre. El ciclo de cobertura está en función de las características orbitales de la plataforma (altura, velocidad, inclinación) así como del diseño del sensor (ángulo de observación y abertura).

## 2.3 PLATAFORMAS.

Fue a partir de la década del 60 cuando comenzó el desarrollo vertiginoso de la percepción remota desde plataformas satelitales.

Hasta 1946 la observación terrestre por percepción remota se efectuaba desde aviones o globos. En ese mismo año, se adquirieron las primeras fotografías desde cohetes, siendo estas experiencias decisivas para ilustrar el potencial de la fotografía desde alturas orbitales. Este potencial se volvió más evidente con las misiones orbitales y espaciales a partir de la década del 60, cómo lo fue el proyecto CORONA de espionaje militar.

Entre las misiones espaciales más destacadas se encuentran: Mercury, Gemini y Apolo.



En particular el Apolo IX realizó la primera experiencia controlada de fotografía orbital multiespectral. Estas experiencias fueron continuadas en posteriores misiones (Skylab, Apolo-Soyuz, etc.)

Sin embargo, el año 1972 marca un hito en el avance de la percepción remota satelital con el lanzamiento, por parte de E.E.U.U., del primero de una serie de satélites ópticos especialmente destinados a monitorear los recursos terrestres. Dicha serie se llamó LANDSAT y actualmente operan el Landsat 5 y Landsat 7.

Por su parte Francia, con la participación de Suecia y Bélgica, lanzó en 1986 el primer satélite de la serie SPOT (Système Pour l'Observation de la Terre) de la cual operan actualmente los Spot 2, 4 y 5.

Actualmente existen muchas otras plataformas satelitales similares a las anteriores y pertenecientes a distintos países o resultantes de acuerdos entre dichos países como Rusia, Japón, India, Argentina, China, Brasil, etc.

### 2.3.1 Plataformas Landsat.

Gracias a los brillantes resultados que proporcionan las primeras fotografías espaciales, la agencia espacial norteamericana, elaboró a finales de la década de los 60, la serie *Landsat* denominada ETRS (Earth Resources Technology Satellite), en la que se construyó el primer satélite exclusivamente dedicado a la observación de los recursos terrestres.

El 23 de Julio de 1972, fue la fecha de inicio del lanzamiento del primer satélite ETRS-1, rebautizado posteriormente como *Landsat 1*. Éste llevaba una cámara vidicon y un radiómetro multiespectral y estaba provisto del sensor MMS (Multiespectral Scanning System).

Entre 1975 y 1978 se lanzaron respectivamente el *Landsat 2* y *3*, que portaban una configuración similar.

El *Landsat 2* tenía el mismo mecanismo que el primero, mientras que el *Landsat 3* incorporaba algunas mejoras como la inclusión de una banda térmica en el sensor MSS y un sistema de vídeo (RBV; Return Beam Vidicon) de un alto poder de resolución de 40 m.

Estos tres satélites constituyen la primera generación de los *Landsat*, que se situaban en una órbita casi polar heliosíncrona, con una inclinación de 99° y a 920 km de altura sobre la superficie terrestre. Tardaban en efectuar una órbita completa 103 minutos y barrían la superficie completa de la Tierra en 18 días, con escenas de 185 km por 185 km.

En 1982, con el lanzamiento del *Landsat 4* se da paso a la segunda generación de los *Landsat*, que modifican las características orbitales y los sensores que transportan. El *Landsat 4* tuvo una vida útil muy corta, ya que sólo proporcionó imágenes desde diciembre de 1982 hasta febrero de 1983, y fue sustituido en 1984 por el *Landsat 5*. Operan a una altitud de 705 km, en una órbita polar heliosíncrona, con una inclinación de 98° y un período de revolución de 98,9 minutos, lo que mejora el ciclo de recubrimiento de 18 a 16 días.

Los satélites de la segunda generación, *Landsat 4* y *5*, mantienen el sensor MSS para garantizar la continuidad de los datos anteriores, eliminan las cámaras RBV e incorporan un nuevo sensor denominado TM (Thematic Mapper) diseñado para la cartografía temática que proporciona datos de mayor resolución espacial, espectral y radiométrica.





A mediados de los 80, el programa *Landsat* entra en una nueva etapa en cuanto a financiación y funcionamiento con la transferencia del programa al sector privado. En 1985, la compañía EOSAT recibe los derechos para vender productos *Landsat* por un período de 10 años con el compromiso de participar en el desarrollo de futuros sensores. Mientras tanto, el gobierno mantenía la responsabilidad en el control físico de la plataforma y se comprometía a colaborar en el desarrollo de los *Landsat* 6 y 7.

Por recortes presupuestarios se temió la continuidad de los *Landsat*, pero finalmente, una nueva ley en 1992 le devuelve la gestión del programa al gobierno.

El *Landsat* 6 lanzado en 1993 fue un fracaso, ya que por fallos de comunicación con la plataforma no se ubicó en la órbita precisa y se perdió.

El *Landsat* 7 se inicia bajo un proyecto en el que participan tres agencias: la NASA responsable del desarrollo, del lanzamiento del satélite y del sector de la Tierra, la NOAA encargada de su operación y mantenimiento durante todo el tiempo de vida del satélite, y la USGS que recoge, procesa y distribuye los datos y se encarga de mantener el archivo de los datos.

Este proyecto culminó con éxito con su lanzamiento el 15 de abril de 1999. Incluye una versión mejorada del sensor TM, el ETM (Enhanced Thematic Mapper), que más tarde, vuelve a ser mejorada y se renombra como ETM+. Incorpora una banda pancromática con una resolución espacial de 15m y una resolución de la banda térmica de hasta 60m. La inclusión del canal pancromático está siendo de gran utilidad para obtener productos cartográficos de mayor calidad, aplicando técnicas de fusión de datos.

#### ❑ Instrumentos de observación.

El MSS es un escáner de tipo transversal con un espejo oscilante que registra una banda de 185 km. Normal a la dirección de la órbita. Posee siete bandas, cuatro de ellas espectrales. El tamaño de la unidad de resolución de campo es de 79 por 79m que corresponde a un IFOV de 0.087 mrad. Cada una de las bandas posee 7.6 millones de píxeles y cada uno de éstos con 64 niveles posibles de gris. El tamaño de cada imagen MSS es de 185 por 185 Km.

Las return-beam vidicons son sistemas del tipo de registro instantáneo, es decir, cámaras de televisión. Los *Landsat* 1 y 2 llevaban tres RBVs que registraron, respectivamente, imágenes en el verde, rojo e IR fotográfico producidas por la misma superficie en el terreno. De una forma conjunta, se denominan imágenes en IR color. La resolución de estas imágenes era de 80 m y la calidad peor que la de MSS, por lo que se utilizaron muy poco.

El *Landsat* 3 empleó dos cámaras RBV, cada una de las cuales cubría un área de 99 por 99 Km siendo las dos áreas adyacentes entre sí con 15 Km de solape. Dos pares de imágenes RBV cubrían una superficie de 181 por 183 Km, aproximadamente equivalente a la de una imagen MSS.

El sistema Thematic Mapper (TM), constituye una mejora fundamental con respecto a MSS, utilizado en los *Landsat* 4 y 5.



## Estudio de un caso práctico.

Responde al tipo de escáner transversal y posee siete bandas espectrales. Las primeras tres bandas pertenecen al rango visible, respectivamente en el azul, verde y rojo, que permiten la realización de composiciones en color normal o natural; la cuarta banda pertenece al IR próximo; las bandas cinco y siete al IR medio y la banda seis al IR Térmico. Esta última, tiene una unidad de resolución de campo de 120 por 120 m. En las demás, la citada unidad es de 30 por 30m.

El tamaño de la imagen es de 185 Km de ancho por 170 Km en la dirección Norte-Sur y el número de píxeles de cada banda es de 39 millones.

El *Landsat 6* tuvo unas características orbitales similares a las de los 4 y 5, llevando el sensor TM e incorporando una banda en pancromático con una resolución de 15 por 15, adquirida simultáneamente con las restantes bandas y corregistrada con ellas. Ese conjunto de bandas recibió el nombre de Enhanced Thematic Mapper (ETM).

Las mejoras incorporadas por *Landsat 7* (actualmente operativo) se refieren, básicamente, a un aumento de resolución espacial en la banda 6 (térmico), pasando de 120 m a 60 m en tal banda. En el resto de las bandas mantienen las características de ETM. Al ser un conjunto ya mejorado se le denomina Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) espacial.

Satélite	Lanzamiento (fin servicio)	Altitud (km)	Periodicidad (días)	Sensor	Banda: Intervalo espectral ( $\mu\text{m}$ )	Resolución espacial (m)
Landsat-1	23-7-72 (6-1-78)	917	18	RBV	(1) 0.48-0.57	80
					(2) 0.58-0.68	80
					(3) 0.70-0.83	80
				MSS	(4) 0.5-0.6	79
					(5) 0.6-0.7	79
					(6) 0.7-0.8	79
					(7) 0.8-1.1	79
Landsat-2	22-1-75 (25-2-82)	917	18	Idéntica configuración que Landsat -1		
Landsat-3	5-3-78 (31-3-83)	917	18	RBV	(1) 0.505-0.75	40
				MSS	(4) 0.5-0.6	79
					(5) 0.6-0.7	79
					(6) 0.7-0.8	79
					(7) 0.8-1.1	79
Landsat-4	16-7-82 (83)	705	16	MSS	(8) 10.4-12.6	240
					(4) 0.5-0.6	82
					(5) 0.6-0.7	82
					(6) 0.7-0.8	82
				TM	(7) 0.8-1.1	82
					(1) 0.45-0.52	30
					(2) 0.52-0.60	30
					(3) 0.63-0.69	30
					(4) 0.76-0.9	30
					(5) 1.55-1.75	30
					(6) 10.4-12.5	120
Landsat-5	1-3-84	705	16	Idéntica configuración que el Landsat-4		
Landsat-6	5-10-93 (5-10-93)	705	16	Fallos en el sistema de comunicación No llegó a funcionar		
Landsat-7	15-4-99	705	16	ETM	(1) 0.45-0.52	30
					(2) 0.52-0.60	30
					(3) 0.63-0.69	30
					(4) 0.76-0.9	30
					(5) 1.55-1.75	30
					(6) 10.4-12.5	120
					(7) 2.08-2.35	30
				PAN	0.50-0.90	15

Tabla 3: Principales características de los satélites Landsat (Fuente: Teledetección José A. Sobrino)





### 2.3.2 Plataforma EO-1

La misión EarthObserving 1 (EO-1) fue lanzada el 21 de noviembre de 2000. Forma parte del programa de la NASA para el Nuevo Milenio (MNP) y es una muestra de las nuevas tecnologías que serán aplicadas para misiones posteriores al *Landsat 7*.

El EO-1 fue puesto en órbita a una altura de 705 Km, cruzando el Ecuador un minuto después del *Landsat 7* y su peso es de 529 Kg.

Su propósito es validar la tecnología avanzada para nuevas misiones *Landsat*, de menor costo y peso considerando la tendencia hacia satélites de menores dimensiones, que permitan incrementar la calidad y cantidad de las misiones.

El original EO-1 misión se completó con éxito en noviembre de 2001. A medida que el final de la Misión se acercaba, los sensores remotos y las comunidades de investigación científica expresaron gran interés en la adquisición continua de datos de imágenes de EO-1.

Sobre la base de este interés de los usuarios y su disposición a ayudar en la financiación de las operaciones continuadas, se alcanzó un acuerdo entre la NASA y la Encuesta Geológica de Estados Unidos para permitir la continuación del Programa de EO-1 como una extensión de la misión.

Por lo que, EO-1 misión extendida fue creada para reunir y distribuir ALI multiespectrales e HYPERION hiperspectrales productos en respuesta a las solicitudes de adquisición de datos (DAR). Los datos de imagen adquiridos por EO-1 son archivados y distribuidos por el Centro de Recursos para la Tierra USGS Observación y Ciencia (EROS) y se coloca en el dominio público.

EO-1 también fue utilizado para probar un nuevo software, como el Experimento Autónoma Sciencecraft. Esto permite a la nave para decidir por sí mismo cuál es la mejor para crear una imagen determinada. Sólo está limitado por una lista de prioridades de los diferentes tipos de imágenes, y por las previsiones de la cubierta de nubes proporcionada por la NOAA.

#### □ Instrumentos de observación.

##### **ALI** (*Advanced Land Imager*)

Es el instrumento primario del satélite EO-1, encargado de captar las imágenes terrestres. Está diseñado para reemplazar al ETM+ (Enhanced Thematic Mapper) en futuras misiones *Landsat*; ya que éste, produce casi cuatro veces mejor rendimiento en sólo un cuarto del coste y peso del *Landsat ETM+*.

Tiene 10 bandas espectrales entre 0.4 y 2.5 micrones, 30 metros de resolución y 10 metros en el pancromático.

Es un barredor tipo “pushbroom” cuyo ancho es de 36 Km. Posee una óptica liviana de carburo de silicio y se calibra con el Sol, la Luna y una lámpara auxiliar.

El hecho de que su ancho de barrido sea de 36 Km se debe a que sólo está equipado con un conjunto de sensores; por lo que en futuras misiones se cubrirán los 180 Km de las imágenes *Landsat*.

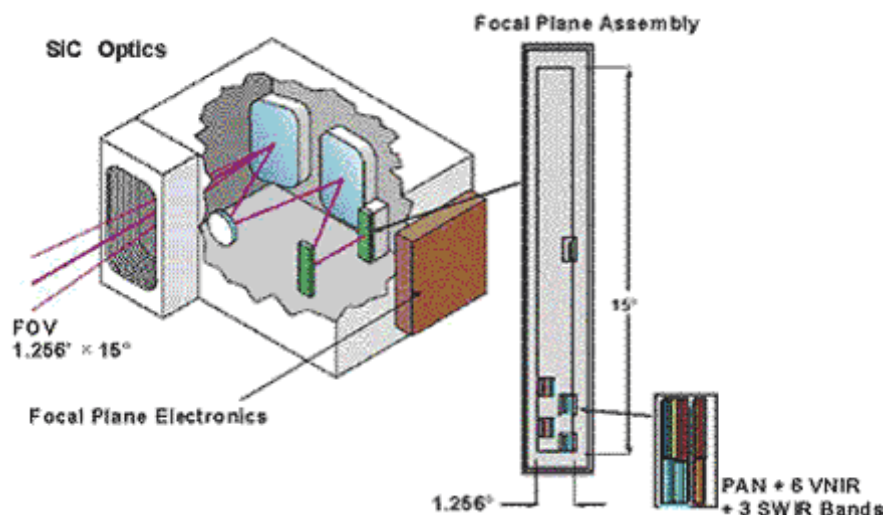


Fig 2.2 Representación visual de las ópticas de carburo de siliceo (Fuente: eo1.usgs.gov)

Las tecnologías de ALI permitirán la reducción de la masa, la energía, la complejidad y el costo de los futuros sistemas de formación de imágenes terrestres. Un ALI plenamente operativo tiene el potencial para reducir el costo y el tamaño de los futuros instrumentos de tipo Landsat por un factor de 4 a 5.

### **HYPERION** (*Hyperspectral Imaging Spectrometer*)

Es el primer sensor hiperspectral de satélite. Dispone de 220 bandas que cubren de 0.4 a 2.5 micrones con 30 metros de resolución. Cada escena cubre 7.5 X 100 Km. captando los 220 colores espectrales de las imágenes de la superficie de la Tierra sin dejar áreas descubiertas. También se calibra con el Sol, la Luna y una lámpara auxiliar.

La disponibilidad de estas imágenes hiperspectrales permite desarrollar nuevas líneas de investigación.

En el futuro, una versión operativa del Hyperion permitirá a los complejos ecosistemas de tierras para ser fotografiado y clasificarse con precisión radiométrica alta.

### **LEISA/AC** (*Linear Imaging Spectrometer Array/Atmospheric Corrector*)

Es el primer corrector espacial de imágenes satelitales por efecto de la variabilidad del contenido de vapor de agua y aerosoles en la atmósfera. Es un instrumento con resolución moderada (250 metros), un ancho de barrido de 185 Km y un cubrimiento espectral de 0.85 a 1.5 micrones

Es una cámara infrarroja utilizada para eliminar los efectos de la atmósfera a partir de imágenes de superficies obtenidas por instrumentos tales como el ALI en EO-1 y *Landsat* y diseñada para obtener una corrección óptima de imágenes de alta resolución espacial.

El problema de la corrección atmosférica de las imágenes satelitales es de particular importancia en el caso de imágenes del océano, ya que el brillo del mismo es muy inferior al de las zonas terrestres, por lo que el efecto de los aerosoles y moléculas de la atmósfera es de gran importancia en los resultados obtenidos, de modo tal que una corrección precisa permitirá desarrollar nuevos estudios.

Parámetros	Landsat 7 ETM+	EO-1 ALI	EO-1 HYPERION	EO-1 AC
Rango Espectral	0.4-2.4 $\mu$	0.4-2.4 $\mu$	0.4-2.5 $\mu$	0.9-1.6 $\mu$
Resolución Espacial	30 m	30 m	30 m	250 m
Ancho de Barrido	185 km	35 km	7.5 km	185 km
Resolución Espectral	variable	variable	10 nm	3-9 nm
Cobertura Espectral	Discreta	Discreta	Continuo	Continuo
Resolución Pancromática	15 m	10 m	N/A	N/A
Número Total de Bandas	7	10	220	256

Tabla 4: Comparación y características del Landsat 7 y del EO-1 (Fuente: [www.conae.gov.ar](http://www.conae.gov.ar))

### 2.3.3 Landsat 8

El Landsat 8 o LDCM (Landsat Data Continuity Mission) es el último ejemplar de la familia de satélites Landsat. Es un satélite de observación de la Tierra construido por Orbital Sciences Corporation para la NASA y el USGS (United States Geological Survey) usando la plataforma LEOStar-3. La NASA es la encargada de la construcción y lanzamiento del satélite, mientras que el USGS se ocupa de la gestión de datos y control de la misión.

El objetivo principal de este programa es observar los efectos del ser humano sobre nuestro planeta.

Tiene una masa de 2782 kg y unas dimensiones de 3 x 3 x 4,8 metros, además de poseer un panel solar con unas dimensiones de 9,75 x 2,6 metros capaz de generar 1351 W. Está dotado de 8 motores de 22 Newton de empuje que se alimentan de un depósito de 395 kg de hidrazina.



Fig. 2.3 Landsat 8 (Fuente: imágenes Google)

El LDCM lleva dos instrumentos científicos:

**OLI** (Operational Land Imager): es una cámara para observación de la Tierra en ocho longitudes de onda del visible y el infrarrojo cercano. Tiene una resolución de 15 metros en modo pancromático y 30 metros en modo multiespectral. Cada imagen del instrumento cubre un ancho de 185 kilómetros.

**TIRS** (Thermal Infrared Sensor): es una cámara infrarroja construida por el centro Goddard de la NASA para medir y cuantificar la gestión de los recursos hidrológicos en la agricultura. Tiene una resolución de 100 metros y las imágenes obtenidas tienen un ancho de 185 kilómetros.

## Estudio de un caso práctico.

En el plano focal del instrumento se encuentran tres módulos de fotodetectores infrarrojos de pozo cuántico (QWIP) con 640 detectores cada uno equivalentes a una disposición lineal de 1850 píxeles efectivos. Los detectores están refrigerados a 43 K, mientras que la temperatura del telescopio de TIRS es de 185 K.

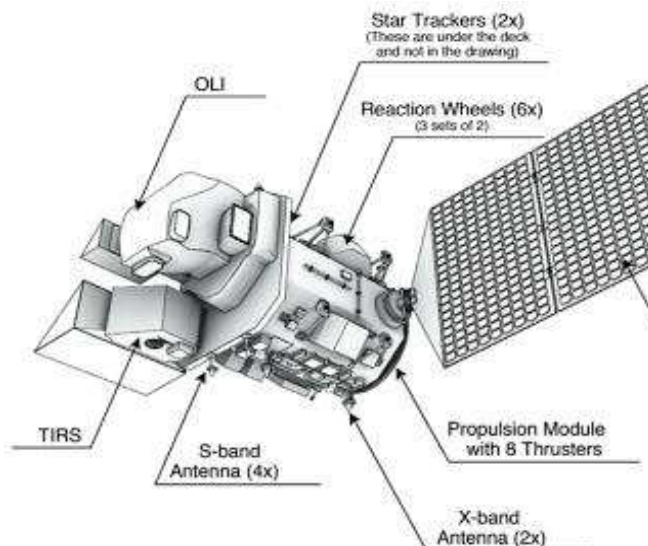


Fig.2.4 Instrumentos de observación del Landsat 8 (Fuente: imágenes Google)

El Landsat 8 tiene una vida útil de 5 años, aunque la vida del instrumento TIRS se estima en unos tres años porque ha sido incorporado tardíamente a la misión. En cualquier caso, el satélite lleva combustible suficiente para garantizar su funcionamiento durante diez años.

Estará situado en una órbita polar heliosíncrona de 705 kilómetros de altura con una inclinación de 98,2°. Desde esta órbita podrá observar toda la superficie de la Tierra cada 16 días. El coste de la misión LCDM es de 855 millones de dólares, incluyendo el lanzamiento.

## 2.4 TIPOS DE IMÁGENES UTILIZADAS.

Las imágenes obtenidas por los satélites de teledetección ofrecen una perspectiva única de la Tierra, sus recursos y el impacto que sobre ella ejercen los seres humanos.

La teledetección por satélite ha demostrado ser una fuente rentable de valiosa información para numerosas aplicaciones. El valor de las imágenes de satélite y la información extraída de ellas ofrecen una visión global de objetos y detalles de la superficie terrestre y facilitan la comprensión de las relaciones entre ellos que pueden no verse claramente cuando se observan a ras de la tierra.

Además de estas ventajas, las imágenes de satélite muestran, literalmente, mucho más de lo que el ojo humano puede observar, al desvelar detalles ocultos que de otra forma estarían fuera de su alcance.

El valor práctico y la multiplicidad de aplicaciones de las imágenes continúan aumentando a medida que se lanzan nuevos satélites, que se suman a los que ya están en órbita. Al haber más satélites se dispone de imágenes en una cantidad creciente de tamaños de escena, resoluciones espectrales, frecuencias de paso y detalles espaciales. Uno de los productos más utilizados en Teledetección son las imágenes proporcionadas por los sensores remotos ópticos: imágenes pancromáticas y multiespectrales.

### 2.4.1 Imagen pancromática.

Las imágenes pancromáticas se captan mediante un sensor digital que mide la reflectancia de energía en una amplia parte del espectro electromagnético (con frecuencia, cuyas porciones del espectro reciben el nombre de bandas). Para los sensores pancromáticos más modernos, esta única banda suele abarcar la parte visible y de infrarrojo cercano del espectro.

Los datos pancromáticos se representan por medio de imágenes en blanco y negro.

Otra característica de este tipo de imágenes es su resolución espacial, característica que determina el tamaño del detalle mínimo que se pueden observar en la imagen proporcionando este mismo tipo de información para una única banda espectral.

### 2.4.2 Imagen multiespectral.

Se entiende por imagen multiespectral la registrada por un sensor que registra información en distintas bandas del espectro electromagnético. La imagen multiespectral está constituida por tantas imágenes como bandas espectrales proporcione el sensor (resolución espectral) de una misma zona de la superficie terrestre.

Cada una de estas imágenes proporciona a su vez información sobre la cantidad de radiación reflejada por las diferentes cubiertas presentes en dicha zona en cada una de las bandas espectrales.

Es posible incluso que dos series de detectores midan la energía en dos partes diferentes de la misma longitud de onda. Estos distintos valores de reflectancia se combinan para crear imágenes de color. Los satélites de teledetección multiespectrales de hoy en día miden la reflectancia simultáneamente en un número de bandas distintas que pueden ir de tres a catorce (normalmente las tres bandas fundamentales: rojo, verde y azul).

Sensores			PANCROMÁTICO	MULTIESPECTRAL
Resolución (mt/pixels)			0.61cm	2.44m
Bandas espectrales	B1	Pancromático	450-900 nm	
	B2	Azul		450-520 nm
	B3	Verde		520-600 nm
	B4	Rojo		630-690 nm
	B5	Infrarrojo cercano		760-900 nm
Ancho de barrido			16,5 km	16,5 km
Tamaño de píxel			0.61m. nadir 0.72m. a 25° del nadir	2.44m. nadir 2.88m. a 25° del nadir

Tabla 5 Comparación de los modos pancromáticos y multiespectrales (Fuente: Teledetección José A. Sobrino)





## 2.5 CORRECCIONES EN LAS IMÁGENES.

Estas correcciones tienden a eliminar cualquier anomalía detectada en la imagen, disponiendo los datos en la forma más cercana posible a una adquisición idónea. No obstante, el término corrección, conviene manejarlo con ciertos matices, puesto que no todas las operaciones pueden calificarse propiamente como soluciones a defectos de adquisición de datos.

Cualquier imagen adquirida por un sensor remoto, ya se aéreo o espacial, presenta una serie de alteraciones radiométricas y geométricas debidas a muy variados factores. Esto explica que la imagen finalmente detectada no coincida exactamente con la radiancia, posición, forma, tamaño de los objetos que incluye.

En el caso concreto de las imágenes espaciales, las deformaciones más frecuentes son las distorsiones originadas por la plataforma, provocadas por la rotación terrestre, por el sensor y las causadas por las condiciones ambientales.

### 2.5.1 Correcciones radiométricas.

Las correcciones radiométricas son un conjunto de operaciones destinadas a modificar los ND originales de una imagen para aproximarse a los valores obtenidos en condiciones ideales.

Para ello, se modifica únicamente el ND (nivel digital, valor del pixel) y se mantienen constantes la posición de los píxeles.

Podemos distinguir dos tipos de operaciones según el efecto que se quiera corregir:

- Los fallos en el funcionamiento del sensor: píxeles perdidos por fallo del detector y bandedo por descalibración.
- La distorsión atmosférica: la dispersión
- Y otra operación diferente pero relacionada, es la conversión de ND a parámetros físicos: la radiancia.

### 2.5.2 Correcciones geométricas.

Estas correcciones de la imagen incluyen cualquier cambio en la posición que ocupan los píxeles que la forman. Por contraposición con las correcciones radiométricas, aquí no se pretende modificar los ND de los píxeles de la imagen, sino sólo su posición y sus coordenadas. Al tratarse de un formato digital, esta transformación puede basarse en funciones numéricas, que permiten modificar muy flexiblemente la geometría de la imagen.

La expresión general de este tipo de funciones es:

$$\begin{aligned}f(c') &= f1(c, l); f(x, y) \\f(l') &= f2(c, l); f(x, y)\end{aligned}\quad (\text{Fórmula n}^\circ 6)$$

Las coordenadas columna y línea ( $c'$  y  $l'$ ) de la imagen corregida son función de las coordenadas columna y línea de la imagen de entrada ( $c, l$ ) o de las coordenadas del mapa al que se pretende superponer la imagen ( $x, y$ ). Por tanto, esta transformación puede emplearse tanto para corregir cartográficamente una imagen, como para superponer dos o más imágenes entre sí.



En el primer caso se pretende encontrar una relación que transfiera los ND de la imagen a su posición cartográfica, en la proyección requerida (habitualmente UTM). Esto permite que la imagen resultante pueda combinarse con información auxiliar o integrarse a un SIG.

En el segundo caso, la transformación geométrica de la imagen tiene por objetivo ajustarla a otra imagen que se considera como referencia, normalmente con objeto de realizar estudios multitemporales o mosaicos para obtener una cobertura más completa del territorio.

La corrección geométrica de imágenes puede abordarse de acuerdo a dos procedimientos. En el primero, denominado corrección orbital, pretende modelar aquellas fuentes de error geométrico conocidas, a partir de aplicar transformaciones inversas a las que realiza el sensor en el momento de la adquisición. Para ello es preciso disponer, con bastante detalle, de las características orbitales de la plataforma y de las especificaciones del sensor. Gracias a ellas pueden corregirse errores sistemáticos, como son los derivados de la rotación o curvatura terrestre y de la inclinación de la órbita. El segundo enfoque más empírico, trata de evaluar el error geométrico de la imagen a partir de una serie de puntos con coordenadas conocidas denominados puntos de control. En este caso, se estima inductivamente, ya que en las funciones de transformación se incluyen simultáneamente todas las fuentes de error, asumiendo que esos puntos sean suficientemente representativos de la deformación geométrica que tiene la imagen.

Ambos métodos tienen sus ventajas e inconvenientes. El primero es mucho más automático, pues los datos orbitales se reciben directamente con las imágenes. Además, resulta muy adecuado cuando el sensor no proporciona información fiable para localizar los puntos de control. Éste es el procedimiento habitualmente empleado para corregir imágenes de baja resolución. Su principal inconveniente es la escasa fidelidad cuando la posición del satélite no se conoce con mucha exactitud o cuando la imagen incluye errores aleatorios.

Las plataformas más modernas incluyen sistemas de navegación mucho más refinados que permiten mejorar notablemente estas correcciones orbitales.

Por su parte, el método de puntos de control resulta bastante tedioso, pues requiere una notable intervención humana para localizar adecuadamente esos puntos, sin embargo, ofrece una exactitud cuando se trabaja sobre zonas e imágenes en donde es clara la identificación de rasgos comunes a la cartografía básica.

#### ❑ Estado de las imágenes adquiridas.

Cada imagen descargada del USGS (United States Geological Survey) Earth Explorer lleva anexo un archivo que contiene toda la información sobre el estado en el que se encuentran.

Estas imágenes vienen corregidas radiométricamente y geométricamente, por lo que no le aplicamos ninguna de estas correcciones.

Geográficamente se disponen en la proyección UTM (Universal Transversa Mercator), cuyo elipsoide utilizado es el WGS84 y en el huso 30 N.



## Capítulo 3. FUSIÓN DE IMÁGENES.

### 3.1 PRINCIPIOS DE FUSIÓN.

La fusión de imágenes es una técnica digital que pretende mejorar una imagen multiespectral y así potenciar su uso en diversas aplicaciones. Para ello, se combinan los datos de una imagen pancromática de alta resolución espacial con los de una imagen multiespectral de alta resolución espectral. El resultado final es una nueva imagen en la cual se ha conservado una buena parte de la riqueza espectral original y se ha ganado resolución espacial.

Existe un amplio rango de aplicaciones de la Teledetección que requieren disponer de imágenes de satélite que combinen ambas características.

Si bien es cierto que en la actualidad existen múltiples satélites, que proporcionan este tipo de imágenes, sus costes son altos y no siempre están disponibles para usuarios comunes. Una forma de disponer de imágenes de alta resolución, tanto espacial como espectral, a costes relativamente accesibles, es la utilización de técnicas de fusión de imágenes que por otro lado pueden proporcionar imágenes de muy alta resolución si son aplicadas a los datos registrados por los sensores de última generación.

En la actualidad se dispone de un gran número de metodologías y algoritmos para la fusión de imágenes ópticas, siendo las más utilizadas las basadas en diferentes transformadas. Algunas son muy sencillas desde un punto de vista conceptual, como las metodologías basadas en la transformada de Brovey, el Análisis de Componentes Principales o la transformada IHS.

Sin embargo, y como se demuestra en numerosos trabajos, estas metodologías proporcionan imágenes fusionadas cuyo color presenta considerables distorsiones respecto al color de las imágenes multiespectrales originales. Esto impide su uso en diferentes tareas habituales en el área de Teledetección, como son la clasificación de imágenes o la detección de cambios.

Por otro lado, existe un elevado número de métodos basados en técnicas de análisis multiresolución, que utilizan fundamentalmente la Transformada Discreta Wavelet (TDW). En general estos métodos proporcionan una mínima distorsión del color de las imágenes fusionadas respecto de la imagen multiespectral, superior a las técnicas descritas más arriba, pero no permiten controlar el compromiso entre la calidad espacial y la espectral de las imágenes fusionadas.

### 3.2 PROCESO DE LOS MÉTODOS DE INTEGRACIÓN.

En el ámbito de la teledetección existen varias aplicaciones de la fusión de imágenes. En este trabajo exponemos múltiples algoritmos de imágenes multiespectrales y pancromáticas.

El proceso de fusión de imágenes de satélite suele constar de una serie de etapas de preprocesado de las imágenes fuente:

- *Remuestreo de las imágenes:* Se trata de encontrar para cada posición un ND que exprese el valor radiométrico más fiel al original.

Este proceso se puede realizar mediante distintos algoritmos de Interpolación como el vecino más próximo, la interpolación bilineal y la convolución cúbica.



## Estudio de un caso práctico.

-*Vecino más próximo*: Este método consiste en asignar a cada celda el ND correspondiente al de la posición más cercana. Este procedimiento no altera los ND de la imagen original, sino solamente los traslada. Puede introducir fracturas en el trazado de los rasgos lineales de la imagen (efecto escalera). Es el único método utilizable en la corrección de imágenes con información cualitativa, como son las imágenes clasificadas.

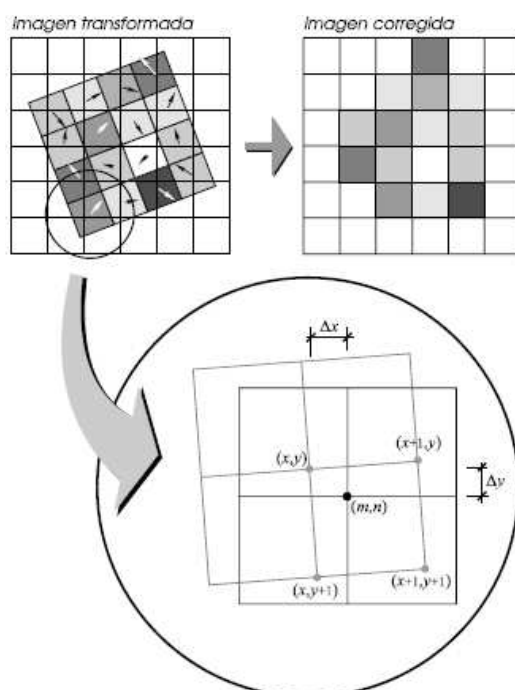


Fig.3.1 Vecino más próximo (Fuente; PDF Correcciones geométricas; Carlos Pinilla)

-*Interpolación bilineal*: Asigna a la celda corregida la media ponderada de los ND correspondientes a las cuatro posiciones más cercanas de la imagen transformada. El peso asociado a cada nivel digital es proporcional a la proximidad entre ellos ( $1-\Delta x$ ,  $1-\Delta y$ ), medida entre centros de celdas.

Este método produce resultados suavizados, pues las cuatro posiciones más próximas contribuyen al ND final. Es apropiado cuando se trata de corregir imágenes con información cuantitativa.

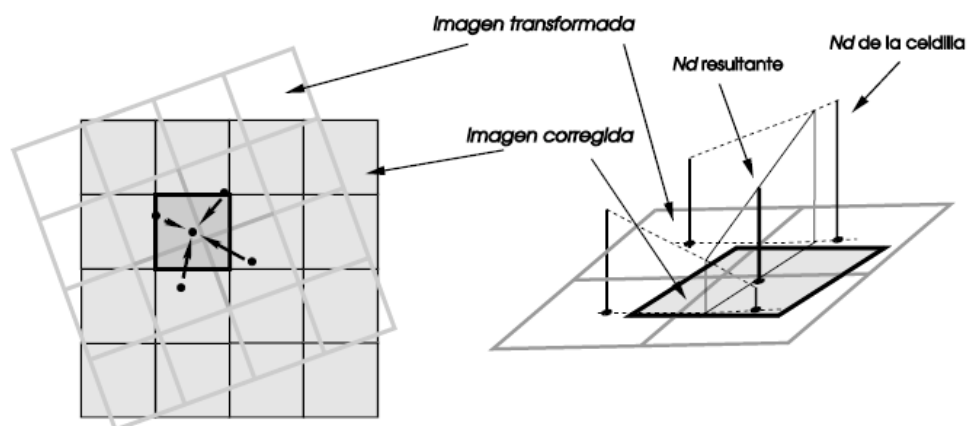


Fig.3.2 Interpolación bilineal (Fuente; PDF Correcciones geométricas; Carlos Pinilla)

-*Convolución cúbica*: Es un interpolador que emplea polinomios de tercer orden. Se involucran las dieciséis celdas más cercanas al punto considerado. Los ND se interpolan linealmente en grupos de cuatro líneas de cuatro píxeles cada una para formar cuatro interpolantes. Posteriormente se realiza otra interpolación lineal entre los cuatro valores obtenidos para asignar el resultante a la celda corregida.

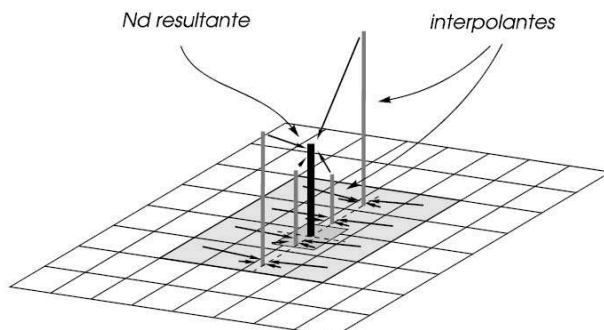


Fig.3.3 Convolución cúbica próximo (Fuente; PDF Correcciones geométricas; Carlos Pinilla)

- Ajuste radiométrico*: opcionalmente también podrá realizarse un ajuste de histogramas de la imagen pancromática respecto al histograma de cada una de las bandas de la imagen multiespectral.

- Georeferenciación*: la cual garantizará que tanto la imagen multiespectral y pancromática sean superponibles, aplicando procesos de corrección geométricos que suelen requerir el establecimiento de una serie de puntos de control.

Una vez que las imágenes fuente han sido preprocesadas, los pasos a seguir en el proceso de fusión son:

- Proceso de fusión*: Este proceso se lleva a cabo de acuerdo al esquema mostrado en la figura siguiente, mediante alguno de los algoritmos de fusión actualmente disponibles. Su complejidad computacional varía notablemente de unos a otros.

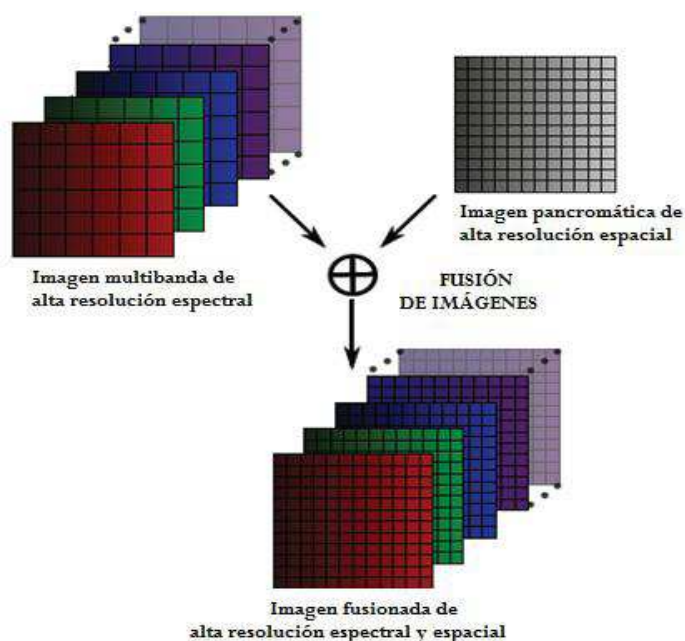


Fig.3.4 Proceso de fusión (Fuente: PDF, fusión politécnica, Javier Merino)

● *Proceso de normalización*: habitualmente, durante el proceso de fusión se modifica la radiometría de las imágenes originales (rango y distribución), por lo que es frecuente la utilización de procesos de normalización. La necesidad de realizar este proceso dependerá del propio algoritmo de fusión y no suele encontrarse documentado en la literatura.

### 3.3 CLASIFICACIÓN Y DOCUMENTACIÓN DE LOS ALGORITMOS.

Existen diferentes formas de clasificar los algoritmos de fusión, atendiendo a los detalles de su implementación y funcionamiento, se pueden clasificar dentro de los siguientes grupos:

#### 3.3.1 Algoritmos clásicos basados en sustitución de componentes.

Su principio teórico es la realización de una transformación de la imagen multiespectral original, en la que una de las componentes en dicha transformación sea similar a la imagen pancromática (componente intensidad, primera componente de PCA,...), de tal forma que al sustituir dicha componente por la imagen pancromática y realizar la operación de transformación inversa se consiga una imagen fusionada de alta resolución espectral y espacial.

En esta clase podemos distinguir los métodos de fusión PCA y fusión IHS.

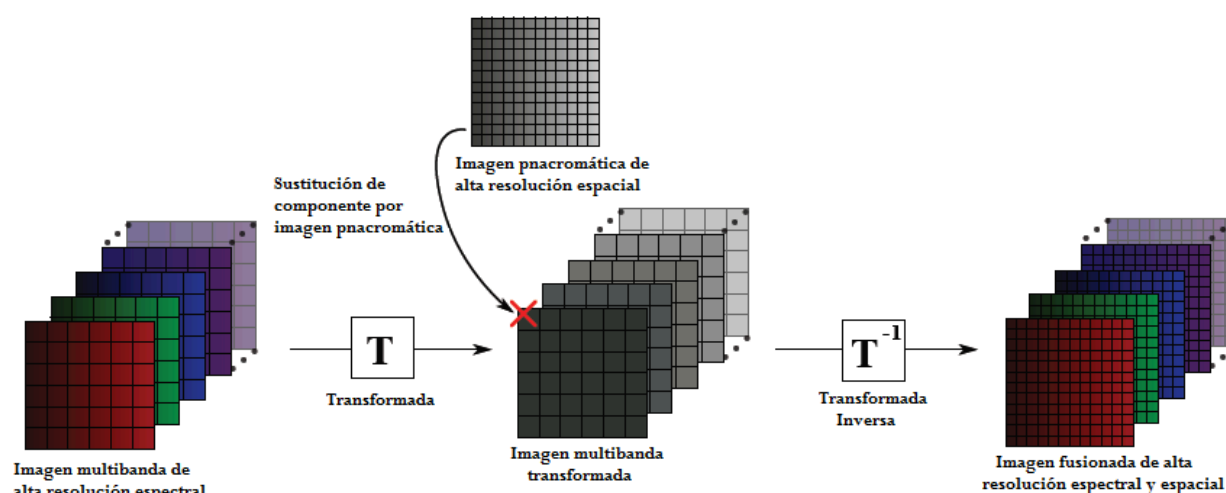


Fig.3.5 Sustitución de componentes (Fuente: PDF, fusión politécnica, , Javier Merino)

#### □ Fusión PCA

La fusión mediante PCA es otro de los algoritmos clásicos de fusión de imágenes de satélite que utiliza el análisis de componentes principales (PCA, transformada de Hotelling o de Karhunen-Loève) como base para aplicar una sustitución de componentes.

La imagen pancromática utilizada puede ser fusionada con imágenes multiespectrales adquiridas simultáneamente por el mismo sensor, o pueden ser usadas imágenes de diferentes sensores. Sin embargo, los mejores resultados se logran cuando las imágenes son tomadas simultáneamente y las resoluciones de las imágenes pancromáticas y multiespectrales son muy parecidas.



El objetivo es resumir un grupo amplio de variables en un nuevo conjunto (más pequeño) sin perder una parte significativa de la información original. La finalidad es construir una o varias imágenes que incrementen su capacidad de diferenciar distintas coberturas. Es por ello que al realizar una composición color resulta interesante usar, en lugar de algunas bandas de la imagen, las componentes principales 1, 2 y 3 en la secuencia RGB respectivamente.

El análisis de componentes principales es una técnica estadística que sintetiza la información, dando importancia a la variabilidad de los datos iniciales.

Existen varias formas de realizar un análisis de componentes principales: utilizando matriz de covarianzas o utilizando matriz de correlación.

#### Matriz de varianzas-covarianzas

Debido al especial interés de la transformada PCA se detalla su cálculo haciendo uso de la matriz de covarianza junto con el cálculo del vector de medias  $M_x$ .

$$cov(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{n-1} \quad (\text{Fórmula n}^\circ 7)$$

Donde  $\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$  (Fórmula n°8)

La matriz de covarianzas de los datos iniciales ( $X$ ) es una matriz simétrica, de la que por tanto siempre se podrán obtener autovalores reales. El siguiente paso del proceso, clave para el correcto funcionamiento del método, consiste en el cálculo y la reordenación de los autovectores en función de sus respectivos autovalores orden descendiente. De este modo se obtendrá una matriz  $A$  de cambio. Una vez calculada dicha matriz se podrá operar de forma algebraica para obtener los valores transformados en componentes principales.

$$Y = A(X - M_x)^t \quad (\text{Fórmula n}^\circ 9)$$

Observando la anterior fórmula resulta inmediato darse cuenta de que se trata de un proceso reversible, hecho que resulta indispensable en el proceso de fusión por sustitución de componentes.

Despejando se obtendrá la transformada inversa del PCA, como se muestra en la ecuación.

$$X = (A^t * Y)^t + M_x \quad (\text{Fórmula n}^\circ 10)$$

El proceso de fusión mediante análisis de componentes conlleva la realización del análisis de componentes de la imagen multispectral remuestreada, de tal forma que la primera componente obtenida será sustituida por la imagen pancromática. Posterior al proceso de sustitución se realizara la transformación inversa de la transformada PCA, de tal forma que se obtendrán los valores de la imagen fusionada.

### Matriz de correlación

$$\rho_x = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & p_{1p} \\ p_{21} & p_{22} & \cdot & \cdot & \cdot & p_{2p} \\ \vdots & & & & & \vdots \\ \vdots & & & & & \vdots \\ \vdots & & & & & \vdots \\ p_{p1} & p_{p2} & \cdot & \cdot & \cdot & p_{pp} \end{bmatrix} \quad (\text{Fórmula n}^\circ 11)$$

En la que los elementos son los coeficientes de correlación lineal de Pearson:

$$\rho_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\sigma_{ii} \sigma_{jj}} \quad (\text{Fórmula n}^\circ 12)$$

Los elementos de la diagonal son “unos” porque son las correlaciones de cada banda consigo misma. Como la correlación entre la banda  $i$  y la  $j$  es la misma que entre la banda  $j$  y la  $i$  ( $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ ) la matriz  $\rho_x$  es simétrica. Cuando hay relación lineal entre pares de bandas las correlaciones son cercanas a 1 ó a -1.

Cuando no hay relación entre bandas ambas matrices son diagonales (los elementos fuera de la diagonal son ceros). En este caso cada banda aporta información diferente y por lo tanto el A.C.P. sería innecesario.

Existen detalles importantes de cara a la implementación, especialmente en el proceso de sustitución, ya que la primera componente del análisis de componentes principales tendrá un rango de valores que diferirá del de la pancromática. Por tanto es necesario normalizar el rango de la imagen pancromática al de la primera componente antes de realizar la sustitución.

Computacionalmente este algoritmo de fusión es pesado, ya que implica: la realización del cálculo de la matriz de covarianza, el cálculo de los autovalores/ autovectores y diversas operaciones algebraicas (producto de matrices, matrices inversas, transposiciones, etc.)

### □ Fusión IHS

Es otro de los métodos considerados como clásicos y de gran importancia, pues ha servido como base teórica para muchos otros algoritmos modernos. Al igual que el algoritmo de fusión por PCA, la fusión IHS también se trata de un algoritmo de sustitución, con la salvedad de que este se realiza mediante una transformación del modelo de color (IHS).

El algoritmo parte del hecho de la disposición de una imagen RGB, por lo que únicamente se podrán fusionar 3 bandas de la imagen multispectral.

IHS son las iniciales de las palabras intensidad, tono y saturación.

El tono es el color real; describe el sombreado del color y dónde se encuentra ese color en el espectro de color. Azul, naranja, rojo y marrón son palabras que describen el tono.

La saturación describe el valor de luminosidad (o blancura) medido en porcentaje de 0 a 100 por ciento. Por ejemplo, cuando se mezcla rojo con una saturación de 0 por ciento, será tan rojo como pueda. A medida que aumenta el porcentaje de saturación, se agrega más blanco y el rojo cambiará a rosa. Si la saturación es del 100 por ciento, el tono carece de sentido (esencialmente, el rojo pierde su color y se vuelve blanco).

La intensidad describe un valor de brillo basado en la cantidad de luz que emana del color. Un rojo oscuro tiene menos intensidad que un rojo brillante. Si la intensidad es del 0 por ciento, el tono y la saturación carecen de sentido (esencialmente, el color se pierde y se vuelve negro).

Como en los algoritmos anteriormente estudiados se realizara un remuestreo escalando las bandas seleccionadas de la imagen multispectral al tamaño de la pancromática, tras lo cual se procederá a realizar la transformación IHS.

A continuación, se sustituirá la componente intensidad por la imagen pancromática tras, opcionalmente antes de realizar la sustitución, realizar un ajuste del histograma de la pancromática tomando como referencia la componente intensidad. Por último, se aplicara la transformación inversa para regresar al modelo de color RGB, obteniéndose las 3 bandas de la imagen fusionada.

La transformación del modelo de color RGB a IHS es una transformación trigonométrica, que viene rejada a través de las siguientes ecuaciones.

$$r = \frac{R}{R+G+B} \quad g = \frac{G}{R+G+B} \quad b = \frac{B}{R+G+B}$$

$$i = \frac{R+G+B}{3 \cdot 255} \quad s \in [0,1]$$

$$h = \arccos \frac{0,5 \cdot [(r-g) + (r-b)]}{(r-g)^2 + (r-b)(g-b)^2} \quad h \in [0, \Pi] \text{ para } b \leq g$$

$$h = 2\Pi - \arccos \frac{0,5 \cdot [(r-g) + (r-b)]}{(r-g)^2 + (r-b)(g-b)^2} \quad h \in [0, 2\Pi] \text{ para } b > g$$

$$s = 1 - 3 \cdot \min(r, g, b) \quad s \in [0,1]$$

(Fórmulas nº13)

Dónde:

R, G y B son los valores digitales de las bandas seleccionadas.

r, g y b son los valores digitales normalizados de las bandas.

i componente intensidad (I).

h componente matiz (H).

s componente saturación (S).





El proceso inverso, de paso de imágenes en modelo de color IHS a RGB, vendrá determinado por las siguientes ecuaciones:

$$x = i * (1 - s)$$

$$y = i * \left[ 1 + \frac{s * \cos h}{\cos h / 3 - h} \right]$$

$$z = 3i - (x + y)$$

(Fórmula nº14)

Las anteriores ecuaciones son necesarias para comprender a nivel teórico como transformar de un modelo de color a otro, sin embargo a efectos prácticos al implementar la fusión mediante IHS se suelen utilizar las ecuaciones, que vienen dadas en forma matricial.

$$\begin{bmatrix} 1 \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ -\frac{\sqrt{2}}{6} & -\frac{\sqrt{2}}{6} & \frac{2\sqrt{2}}{6} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \sqrt{2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Pan \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$$

(Fórmula nº15)

Como se puede apreciar, utilizando las anteriores expresiones matriciales, se puede simplificar la implementación mediante el producto de dos matrices y evitar problemas computacionales derivados de la formulación trigonométrica.

La fusión mediante IHS es un algoritmo de bajo coste computacional que ha servido como inspiración a numerosos algoritmos de fusión, especialmente cabe mencionar el algoritmo Fast IHS que, como su nombre indica, permite acelerar el proceso de fusión de forma sustancial.

### 3.3.2 Algoritmos basados en operaciones aritméticas.

Son algoritmos sencillos, de poca complejidad computacional. Muchos de estos algoritmos tienen como base teórica la sustitución de componentes, y suelen ser aproximaciones de los anteriores mediante simplificaciones demostradas matemáticamente.

Gran parte de estos algoritmos pueden ser implementados para ejecutar en tiempo lineal y permiten fusionar todas las bandas de forma simultánea. En esta clase destacan las fusiones FIHS, FIHS SRF, la transformada de Brovey y el algoritmo piramidal de Mallat (TDWM).

## □ FIHS (Fast IHS)

Surge como mejora de la eficiencia del algoritmo por sustitución IHS, preservando exactamente los mismos principios teóricos. La única variación que sufre este algoritmo con respecto a su predecesor surge de simplificar el proceso de la transformación inversa, paso de modelo de color IHS a RGB, de tal forma que se puede demostrar matemáticamente.

Utilizando la forma matricial anteriormente expuesta se puede operar de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \sqrt{2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Pan \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \sqrt{2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 + (Pan - 1) \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \sqrt{2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I + \delta \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$$

(Fórmula nº16)

Tras lo cual se podrá concluir la siguiente simplificación:

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + \delta \\ G + \delta \\ B + \delta \end{bmatrix}$$

Dónde:  $\delta = Pan - I$  (Fórmula nº17)

Como se puede observar, el proceso de fusión IHS ha quedado reducido a realizar operaciones de suma y resta, ya que la componente intensidad por definición puede ser calculada.

Evidentemente se ha conseguido mejorar la eficiencia del algoritmo, pero a su vez existe otra diferencia importante con respecto al algoritmo IHS original: el algoritmo FIHS sí permite ser extendido a cualquier número de bandas. Esto es debido a que la componente intensidad puede ser calculada como la media de los valores de los distintos valores de cada píxel de la imagen multiespectral, quedando así resuelta la principal desventaja de su predecesor.

En términos computacionales se puede decir que es ligeramente mayor, prácticamente despreciable, que la transformada de Brovey pero suele ofrecer resultados espectrales bastante más razonables. Por este motivo no es de extrañar que multitud de métodos de fusión se basen en esta transformada.

### ❑ FIHS SRF

Nace como mejora del algoritmo Fast IHS que, aunque la base teórica es idéntica, pretende tener en cuenta además la respuesta espectral de los sensores. Es por ello que, a diferencia de los algoritmos ya estudiados, este método requiere trabajar con valores radiancias en lugar de emplear valores digitales. Es conveniente consultar la documentación de cada uno de los sensores para poder determinar cómo convertir valores digitales a radiancias y viceversa.

El algoritmo es aplicable a cualquier número de bandas y utiliza la misma expresión algebraica que el FIHS:

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \\ NIR' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + \delta \\ G + \delta \\ B + \delta \\ NIR + \delta \end{bmatrix}$$

Dónde:  $\delta = I' - I$  (Fórmula nº18)

Como se puede observar, el cálculo de  $\delta$  es diferente al del FIHS y además se define una componente intensidad nueva ( $I'$ ) que dependerá del valor de la pancromática y de la respuesta espectral:

$$I' = \frac{1}{n_{bands}} * \gamma * n_p$$

$$\gamma = \sum_{i=1}^4 \frac{P(m_i/p)}{P(p/m_i)}$$

(Fórmula nº19)

Se debe hacer notar que, para el cálculo del parámetro, es necesario conocer las curvas de respuesta espectral de los sensores que captaron la escena, mediante las cuales se podrán calcular las funciones de probabilidad necesarias.

Las curvas de respuesta espectral son un dato que directamente proporcionará el proveedor de imágenes y que, en principio, no deberán sufrir grandes variaciones con el paso del tiempo.

### ❑ Fusión de Brovey

Es un algoritmo basado en operaciones aritméticas y en el modelado espectral, originariamente diseñado para imágenes de satélite de tres bandas (composiciones RGB). La transformada de Brovey se desarrolló para incrementar el contraste visual en el histograma de datos de alta y baja gama.



Utiliza un método que multiplica cada píxel multiespectral remuestreado por la relación de la intensidad de píxel pancromático correspondiente a la suma de todas las intensidades multiespectrales. Asume que el rango espectral que abarca la imagen pancromática es el mismo que el que cubren los canales multiespectrales.

$$DN_f = \frac{DN_{bi}}{DN_{b1} + DN_{b2} + DN_{b3}} * DN_{NH}$$

(Fórmula nº20)

Dónde:

$DN_f$  es el valor digital fusionado.

$DN_{bi}$  el valor digital de la imagen multiespectral.

$DN_{NH}$  el valor digital de la imagen pancromática.

Al realizar la implementación del algoritmo ha de tenerse en cuenta que los valores a utilizar deben estar normalizados para evitar desbordamientos de rango.

El algoritmo anterior es fácilmente extensible a “n” bandas, una forma trivial de conseguirlo es aplicando la anterior fórmula a cada una de las bandas.

Sin embargo, nótese en la expresión del denominador, se puede realizar una mejora de este algoritmo generalizándolo tal y como detalla la ecuación.

$$DN_f = \frac{DN_{bi}}{\sum DN_{bn}} * DN_{HR}$$

(Fórmula nº21)

Donde:

$DN_{bn}$  es el sumatorio de los valores digitales de todas las bandas de la imagen multiespectral.

Al igual que en el caso anterior, será necesario un proceso de normalización del resultado.

Este algoritmo es de especial importancia por su sencillez de cómputo y capacidad para obtener resultados de visualización razonables, un ejemplo directo de uso puede encontrarse en multitud de sistemas GIS. Aunque su desventaja es que da como resultado imágenes de baja calidad espectral.

#### □ Gram-Schmidt

En el método espectral Gram Schmidt, descrito por sus inventores Laben y Brower (2000), la resolución espacial de la imagen multiespectral es realizada por la fusión de la imagen de alta resolución pancromática con las bandas de baja resolución espacial multiespectral.

La fusión de Gram Schmidt simula una banda pancromática de las bandas espectrales de baja resolución espacial. En general, esto se logra mediante un promedio de las bandas multiespectrales



Según la descripción de los autores los pasos principales de los métodos son los siguientes:

- 1.) Una baja resolución espacial de la imagen pancromática es simulada.
- 2.) Se realiza la transformación de Gram-Schmidt en la resolución espacial baja de la imagen pancromática simulada con la pluralidad de imágenes de banda espectral de baja resolución espacial.  
La imagen pancromática simulada de baja resolución espacial se emplea como la primera banda en la transformación de Gram-Schmidt.
- 3.) Las estadísticas de la imagen pancromática con resolución espacial superior se ajustan para que coincida con las estadísticas de la banda de la primera transformación resultantes de la transformación de Gram-Schmidt para así producir una nueva imagen pancromática con mayor resolución espacial.
- 4.) Esta nueva imagen es substituida por la banda de la primera transformación resultante de la transformación de Gram-Schmidt para producir un nuevo conjunto de bandas transformadas.
- 5.) La transformación inversa de Gram-Schmidt se realiza en el nuevo conjunto de transformación para producir la imagen de mayor resolución espacial multiespectral

#### □ Transformada de Wavelet: Algoritmo de Mallat

La transformada wavelet puede descomponer una señal, como una imagen, en dos partes; una correspondiente a un aproximante que sería la parte grosera de la imagen y otra correspondiente a los detalles como sería la geometría de los objetos singulares.

En la última década, las estrategias de fusión de imágenes más utilizadas, se han basado en técnicas de análisis multiresolución.

El análisis multiresolución permite descomponer datos bidimensionales en componentes de distinta frecuencia y estudiar cada componente a una resolución acorde con su escala.

A diferente resolución, el detalle de una imagen caracteriza diferentes estructuras físicas de la escena (Mallat, 1989); a resoluciones groseras, este detalle corresponde a las estructuras de mayor tamaño mientras que a resoluciones más detalladas, esta información corresponde a las estructuras de menor tamaño.

El concepto de análisis multiresolución se deriva de la idea de algoritmos piramidales empleada por primera vez por Burt y Adelson (1983), quienes emplearon estos algoritmos para analizar el detalle de señales a diferentes resoluciones. Con el fin de facilitar los cálculos, se trabajaron con resoluciones decrecientes diádicas. También Mallat utiliza este factor de degradación.

Para poder comprender el concepto de análisis multiresolución aplicado a datos bidimensionales es muy útil imaginar una pirámide: la base de la pirámide representa la imagen original, con ' $f$ ' filas y ' $c$ ' columnas. Cada nivel de la pirámide, al que se accede desde el nivel inmediatamente inferior, es una aproximación de la imagen original. Se cumple que en cada nivel  $N$  la imagen aproximación tiene ' $f/2^N$ ' filas y ' $c/2^N$ ' columnas, es decir, conforme se asciende de escalón o nivel en la pirámide, las sucesivas aproximaciones van teniendo cada vez menor resolución.

Cada una de estas aproximaciones se obtienen utilizando funciones de escala. Éstas son funciones asociadas a la Wavelet Madre  $c(x)$  que permiten analizar los datos a diferentes resoluciones.

La descomposición wavelet es un proceso iterativo, con sucesivas aproximaciones, la cual recibe el nombre de descomposición de árbol.

Este método consiste en combinar los coeficientes de la Wavelet de la imagen pancromática y de la imagen multiespectral. Para el efecto, se tiene en cuenta la relación entre los tamaños de píxel de la imagen pancromática y de la imagen multiespectral.

La fusión de imágenes basada en Wavelet puede ser realizada de dos formas:

- 1) Remplazando los coeficientes de detalle de la Wavelet de la imagen multiespectral por los coeficientes correspondientes de la imagen pancromática.
- 2) Adicionando los coeficientes de detalle de la wavelet de la imagen pancromática a los coeficientes correspondientes de la imagen multiespectral.

### *Algoritmo de Mallat*

Existen diferentes formas de calcular esta transformada. En particular, el algoritmo piramidal de Mallat (TDWM) es uno de los más ampliamente utilizados dentro de las estrategias de fusión de imágenes de satélite debido a la alta calidad espectral que caracteriza a las imágenes fusionadas mediante este método.

Sin embargo, la baja direccionalidad del proceso de filtrado (horizontal, vertical y diagonal) y su carácter decimado, presenta como principal problema la aparición del efecto diente de sierra que deteriora notablemente la calidad espacial de las imágenes fusionadas.

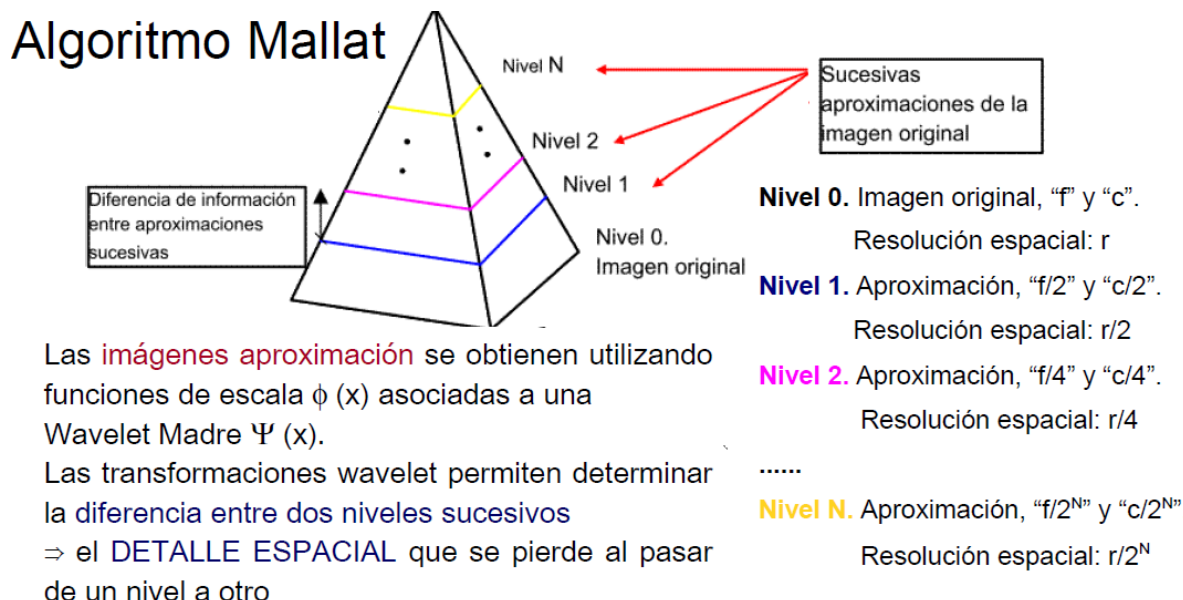


Fig.3.6 Algoritmo Mallat (Fuente: PDF, fusión de imágenes de muy alta resolución, Anabella Medina)



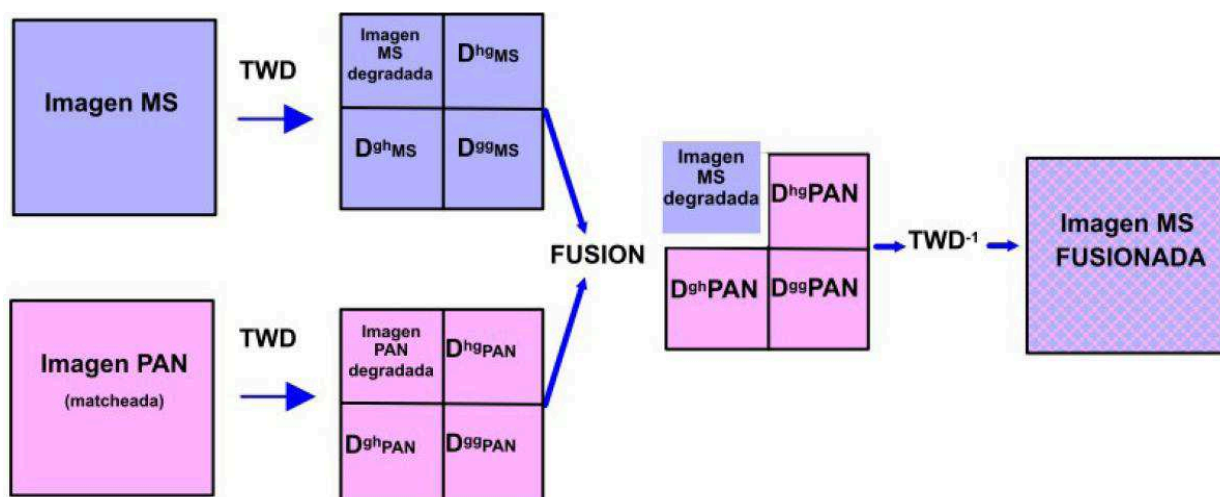


Fig.3.7 Método de fusión basado en el algoritmo de Mallat (Fuente: PDF, fusión de imágenes de muy alta resolución, Anabella Medina)

### 3.3.3 Algoritmos jerárquicos basados en convoluciones y aplicación de filtros.

Son por definición más costosos y actúan de forma iterativa. Tienen una base matemática sólida, el ejemplo más notorio son los métodos basados en transformadas Wavelet que permiten la extracción e incorporación de detalles bajo distintos niveles de degradación. Destacan el algoritmo de Á trous y la fusión MDMR.

#### □ Transformada de Wavelet: Algoritmo de Á trous.

También conocido como algoritmo de fusión wavelet Á trous. Es un algoritmo basado en la transformada discreta wavelet (TDW), la cual es una transformación lineal que es de gran utilidad en el área del procesamiento de señales. Una característica principal de esta transformada es la capacidad de separar en conjuntos de datos en componentes de distinta frecuencia espacial, lo que resulta ser una excelente herramienta para la fusión de imágenes. Tal es la utilidad de estas transformadas que también han motivado algoritmos de mejora sobre algoritmos clásicos como IHS y PCA.

La transformada Á trous es un método de cálculo específico de la TDW, que a diferencia de otros métodos, como el algoritmo piramidal de Mallat, se caracteriza por la independencia direccional del proceso de filtrado, el cual además resulta ser redundante (entre diversos niveles de degradación no existe compresión espacial).

El método de fusión Á trous requiere de un proceso de filtrado iterativo, en cual para la obtención de los coeficientes wavelet será necesario aplicar una serie de filtros de degradación.

La forma de generar dichos filtros se realiza partiendo de un filtro inicial al cual, de forma iterativa, se le añadirán las y columnas de ceros intercaladas entre las filas y columnas del filtro de la iteración anterior. A modo de ejemplo se ofrece un filtro de degradación inicial ( $h_j$ ) y el filtro de la siguiente iteración ( $h_{j+1}$ ):

$$h_j = \frac{1}{255} \begin{pmatrix} 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 6 & 24 & 36 & 24 & 6 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \end{pmatrix}$$

$$h_{j+1} = \frac{1}{255} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 4 & 0 & 6 & 0 & 4 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 16 & 0 & 24 & 0 & 16 & 0 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 6 & 0 & 24 & 0 & 36 & 0 & 24 & 0 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 16 & 0 & 24 & 0 & 16 & 0 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 4 & 0 & 6 & 0 & 4 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

(Fórmula nº22)

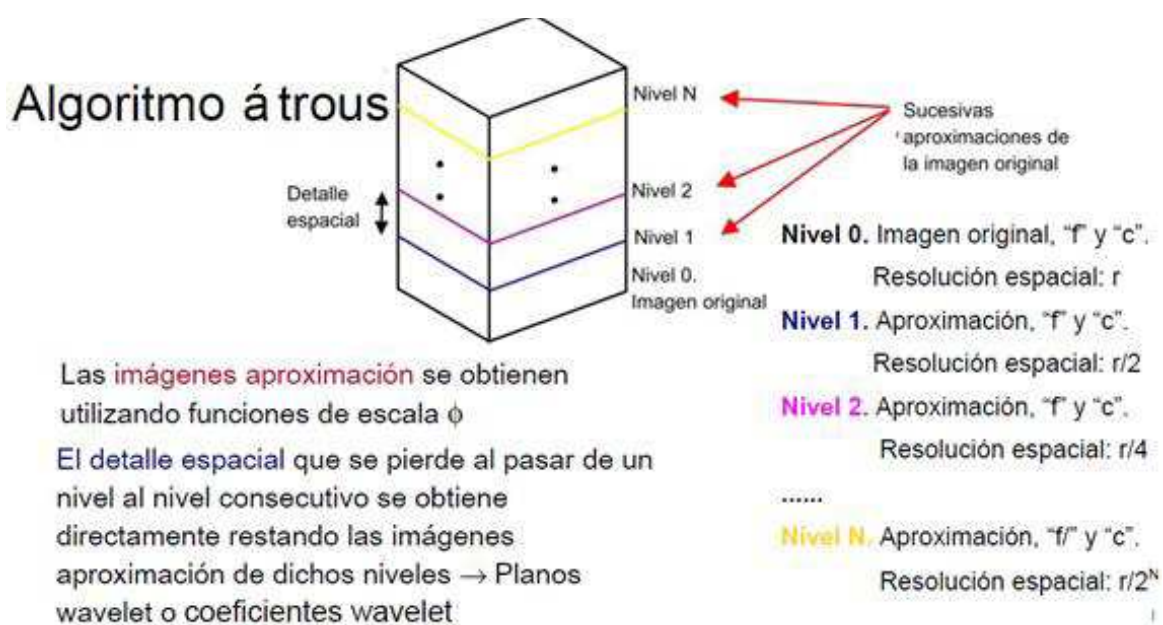


Fig.3.8 Algoritmo Á trous (Fuente: PDF, fusión de imágenes de muy alta resolución, Anabella Medina)

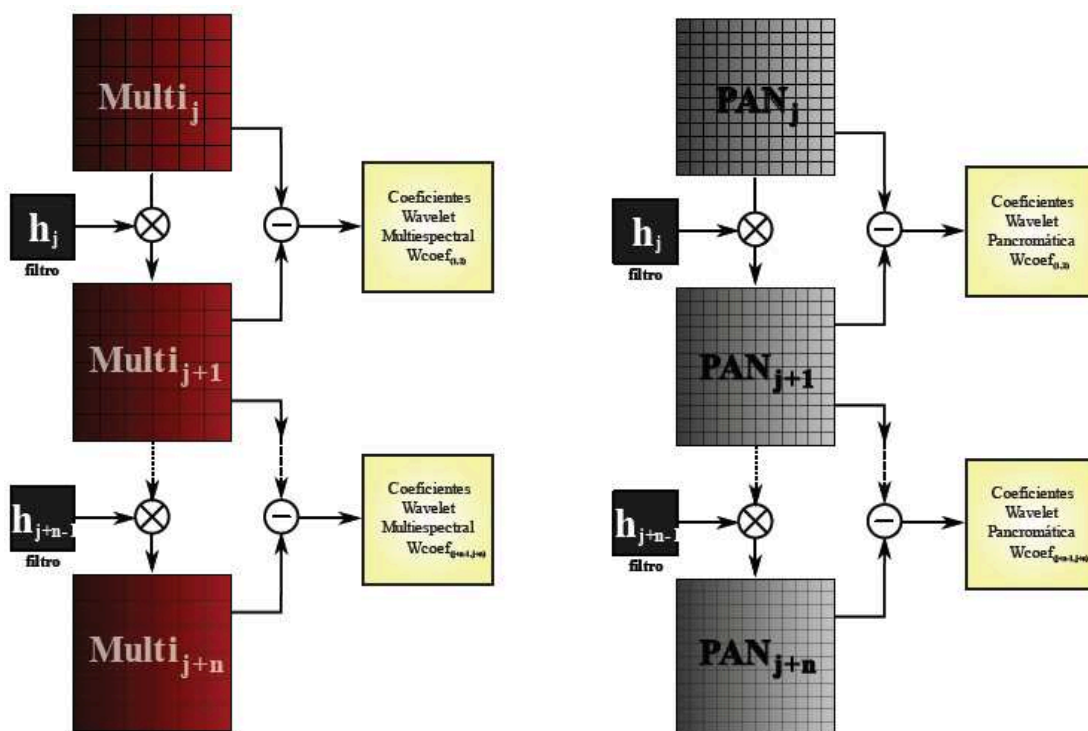


Fig.3.9 Cálculo de los coeficientes wavelet en algoritmo de Á trous (Fuente: PDF, fusión politécnica, Javier Merino)

#### □ Algoritmo de fusión MDMR.

También conocido como algoritmo de fusión Multidireccional-Multiresolución propuesto por Lillo-Saavedra y Gonzalo. Preserva la misma idea que el algoritmo Átrous ponderado de conseguir imágenes fusionadas con un compromiso entre la resolución espacial y la espectral. Su principal objetivo es combinar la sencillez de la transformada Wavelet (Átrous) y beneficiarse de las propiedades de las transformadas direccionales.

El proceso de fusión es prácticamente idéntico al expuesto en el método de fusión Átrous, tal y como detalla la siguiente ecuación:

$$coef_{\theta n}(x, y) = Image_{\theta n}(x, y) - Image_{\theta n-1}(x, y)$$

(Fórmula nº23)

Sin embargo, se puede observar como el concepto “nivel de degradación” ha sido sustituido por el de “filtro de ángulo  $\phi$  (acimut). En efecto, la diferencia entre los algoritmos radicarán en los filtros aplicados de tal forma que en el caso del algoritmo MDMR se emplean *filtros direccionales*.

Computacionalmente es similar a la fusión mediante algoritmo Átrous, aplicando los filtros mediante el teorema de convolución, ya que el proceso de generación de los filtros direccionales se puede considerar despreciable. En concreto, debido a la sencillez, se propone la utilización de filtros elipsoidales direccionales, por lo que para poder interpretarlos resulta de interés recordar la ecuación general de una elipse:

$$\frac{(x - x')^2}{a^2} + \frac{(y - y')^2}{b^2} = 1$$

(Fórmula nº24)

Donde  $x'$  e  $y'$  representarán las coordenadas del centro de la elipse.

Como se ha especificado anteriormente el filtro ha de ser direccional, es decir, en cada iteración del proceso de fusión el filtro variará en función de un ángulo. Concretamente el filtro propuesto se rige por esta ecuación:

$$H(u, v) = \begin{cases} 1 & \text{si } \frac{(u * \cos \theta - v \sin \theta)^2}{a^2} + \frac{(u * \sin \theta + v \cos \theta)^2}{b^2} \leq 1 \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

(Fórmula nº25)

Donde “a” es la escala, “b” la elongación de la elipse y “ $\theta$ ” el ángulo de giro.

Lakshmanan demostró que existe una forma aproximada de dicho filtro:

$$H(u, v) = H_1(u) * H_2(v) - \alpha u H_1(u) * v H_2(v)$$

Donde:

$$\alpha = \frac{(a^2 - b^2) \sin 2\theta}{a^2 * b^2}$$
$$H_1(u) = \exp \left( -u^2 \left( \frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\sin^2 \theta}{b^2} \right) \right)$$
$$H_2(v) = \exp \left( -v^2 \left( \frac{\sin^2 \theta}{b^2} + \frac{\cos^2 \theta}{a^2} \right) \right)$$

(Fórmula nº26)

La forma en la que los filtros son aplicados se realiza de forma análoga al método Átrous como se puede apreciar en esta figura.

Finalmente, se puede comprobar que el proceso de fusión es idéntico al expuesto en el algoritmo de fusión de Átrous, utilizando esta ecuación:

$$FUS^i(x, y) = MULTI_{\theta_k}^i(x, y) + \sum_{n=1}^k Coef_{\theta_n}^{PAN}(x, y)$$

(Fórmula n°27)

Donde:

$FUS^i(x, y)$  representa la i-ésima banda de la imagen fusionada.

$MULTI_{\theta_k}^i(x, y)$  representa la i-ésima banda de la imagen multiespectral degradada k direcciones.

$\sum_{n=1}^k Coef_{\theta_n}^{PAN}(x, y)$  representa la suma de coeficientes de la imagen pancromática degradada.

Si contrastamos el algoritmo de fusión MDMR con el algoritmo de Átrous ponderado, se puede apreciar como diferencia la existencia de un parámetro  $\alpha$  en el algoritmo Átrous de ponderación, mientras que éste es inexistente en el método MDMR. Ambos son algoritmos destinados a alcanzar un compromiso entre la resolución espectral y espacial de las imágenes fusionadas, sin embargo la diferencia reside en como tratan de conseguirlo. Mientras que el método Átrous ponderado recurre a un parámetro “artificial” ( $\alpha$ ) el método de fusión MDMR lo consigue directamente a través de los parámetros de generación de los filtros (escala y elongación de la elipse).

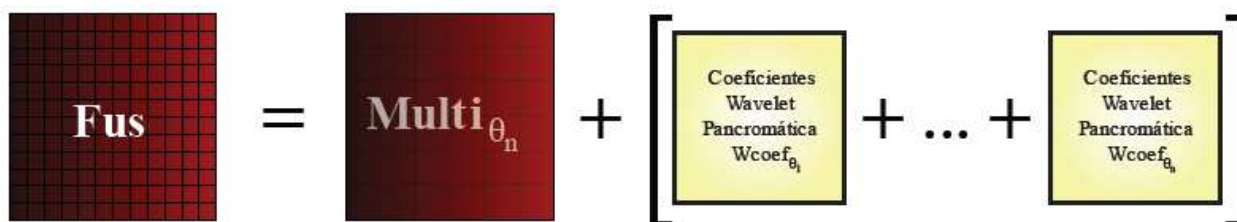


Fig.3.10 Esquema de método de fusión MDMR (Fuente: PDF, fusión politécnica, Javier Merino)

### 3.4 CLASIFICACIÓN Y DOCUMENTACIÓN DE LOS ALGORITMOS DE MEDIDAS DE CALIDAD.

La fiabilidad o validez de los métodos de fusión empleados se estima a partir del análisis de la calidad espectral y espacial de las imágenes fusionadas resultantes.

En general, cuanto mayor sea la cantidad de información de detalle espacial de la imagen pancromática incorporada a la imagen multiespectral durante el proceso de fusión, mayor será la calidad espacial de la imagen fusionada resultante.

La calidad espacial de una imagen fusionada se determina comparando esta imagen con la pancromática original. Esta comparación, al igual que en el caso del análisis de calidad espectral, se realiza tanto visual como cuantitativamente.



### 3.4.1 Métodos cualitativos (medidas subjetivas).

La comparación visual se realizará a partir de composiciones RGB, como por ejemplo la utilización de composiciones en falso color utilizando las bandas IRC, Rojo y Verde, tanto de la imagen original como la fusionada.

La calidad espectral de la imagen fusionada es mayor cuanto mayor sea la coincidencia de tono e intensidad de colores entre la composición RGB de esta imagen y de la original. Este método viene apoyado mediante otros cuantitativos para su mejor evaluación y eficacia.

#### ❑ Análisis visual de las imágenes.

El análisis visual de imágenes se realiza empleando tres bandas del sensor coincidiendo con la capacidad de los monitores. Éstos, poseen un total de tres cañones RGB, con los que, por combinación de estos tres colores básicos, se construyen el resto.

Empleando estos tres cañones tenemos la posibilidad de enviar en cada uno de ellos una de las bandas del sensor, combinándose en nuestra pantalla y dando distintos colores y tonos para así analizar visualmente la imagen.

#### ➤ Combinación en color natural RGB (3, 2, 1)

Esta combinación suele llamarse “color natural o verdadero” ya que involucra a las tres bandas visibles asignándole a cada una de ellas su verdadero color, constituyendo la combinación más próxima a la percepción de la tierra

Las bandas visibles dan respuesta a la luz que ha penetrado más profundamente, y por tanto sirven para discriminar el agua poco profunda y para distinguir las aguas turbias, las corrientes, la batimetría y las zonas con sedimentos. La vegetación aparece en diversos tonos de verde y los suelos en colores marrones o tostados.

#### ➤ Combinación en falso color infrarrojo RGB (4, 3, 2)

Esta combinación suele llamarse “falso color infrarrojo” pues los colores resultantes en la imagen son similares a los de las fotografías obtenidas con film infrarrojo color.

Al asignar el rojo a la banda 4 (NIR) resultará que todos los tonos de rojo, desde el rojo muy oscuro al rosado pálido corresponden a vegetación: los tonos más oscuros se relacionan con la presencia de vegetación arbórea densa, como bosques, montes, etc; y los rojos claros indican cultivos y praderas vigorosas. Los rosados corresponden a vegetación poco densa como pasturas naturales. El celeste corresponde a suelo desnudo, seco o áreas rocosas. El azul-celeste puede corresponder a zonas urbanas. El azul oscuro a negro se relaciona con agua clara en cursos o cuerpos de agua. Si éstos presentan partículas en suspensión aparecerán con tonalidades azul-verdosas (cian). Los colores verdes a verdes azulados corresponden a parcelas aradas o suelos descubiertos con mayor o menor contenido de humedad.

#### ➤ Combinación en falso color RGB (4, 5, 3)

Al asignarle el color rojo a la banda 4 (infrarroja cercana) esta banda va a tener ciertas similitudes con la combinación RGB 4, 3, 2. Sin embargo, al dar más peso a la región infrarroja (bandas 4 y 5) se ve realizada con gran detalle la diferencia de humedad en suelos y vegetales.





Generalmente cuanto mayor es la humedad del suelo más oscuro aparecerá éste. En cuanto a la vegetación se mostrará en colores marrones, verdes y naranjas.

Estas son algunas de las combinaciones que más se frecuentan pero hay muchas más posibilidades como pueden ser la combinación en falso color RGB (5, 4, 3), que constituye una "simulación" del color natural, pese a utilizar 2 bandas infrarrojas, la combinación en falso color RGB (7, 4, 2), cuyas áreas urbanas aparecen en tonos magentas, las praderas en verde claro y de verde oliva a verde brillante indica áreas forestales, entre otras.

### 3.4.2 Métodos cuantitativos.

En cuanto a la evaluación de la calidad de imágenes fusionadas, se dispone de diferentes métodos e índices de comparación que permiten medir la calidad espacial, espectral y/o la calidad global.

#### □ Coeficiente de correlación.

El coeficiente de correlación (CC) se define como una técnica estadística usada para determinar la relación de dos o más variables. Siguiendo esta definición se puede comprobar que es aplicable al control de calidad si se efectúa una correspondencia entre los píxeles de la imagen fusionada y los píxeles de la imagen multiespectral o pancromática.

Se define el cociente de correlación mediante la siguiente ecuación:

$$r = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X * \sigma_Y}$$

(Fórmula nº28)

Donde:

$\sigma_{XY}$   $\sigma_{XY}$  Es la covarianza de la imagen transformada y la original  
 $\sigma_Y \sigma_Y$  Es la varianza de la imagen transformada  
 $\sigma_X \sigma_X$  Es la varianza de la imagen original

El cálculo del coeficiente de correlación de dos imágenes es un proceso computacionalmente simple que puede llevarse a cabo en un tiempo lineal, pero al igual que ocurre con la diferencia de medias y desviaciones la fiabilidad de estén índice puede ser cuestionable. La correlación se realiza entre la imagen fusionada y una de las dos imágenes fuente, bien la multiespectral o la pancromática, por lo solo se tendrá en cuenta la calidad espacial o bien la espectral.

#### □ RMSE.

Responde a las siglas Root Mean Square Error también conocido como error estándar. Es empleado frecuentemente en estadística para describir con precisión errores aleatorios y sistemáticos. Esta función estadística permite obtener el error producido entre la estimación de los valores (se considerar a la imagen multiespectral o la pancromática) y los obtenidos (imagen fusionada):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (MS_{kl}(i) - MS'_{kl}(i))^2}{n}}$$

(Fórmula nº29)

Donde:

$n$  es el numero de píxeles.  
 $MS_{kl}$  es la imagen original para la banda k.  
 $MS'_{kl}$  es la imagen fusionada, banda k.

### □ Índice Zhou (mediante filtro laplaciano).

Se presenta el índice de Zhou, como una estrategia para medir la cantidad de información espacial aportada a la imagen fusionada por la imagen pancromática. El algoritmo se basa en la detección de bordes, concretamente haciendo uso del kernel laplaciano:

$$\begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{pmatrix}$$

(Fórmula nº30)

Dicho filtro se aplica mediante un proceso de convolución tanto a las bandas de la imagen fusionada como a la imagen pancromática.

Ha de notarse que, a diferencia de otros índices estudiados con anterioridad, la complejidad computacional se ve sensiblemente afectada por el proceso de convolución.

Una vez aplicado el filtro Laplaciano a ambas imágenes (fusionada y pancromática) el índice de Zhou vendrá determinado por la ecuación:

$$Zhou = \frac{\sum_{j=1}^n ((FUS^i(j) - \overline{FUS^i})(PAN^i(j) - \overline{PAN^i}))}{\sqrt{\sum_{j=1}^n ((FUS^i(j) - \overline{FUS^i})^2 \sum_{j=1}^n (PAN^i(j) - \overline{PAN^i})^2}}$$

(Fórmula nº31)

Donde:

FUSi(j) representa el valor del pixel j de la i-ésima banda fusionada filtrada.

FUSi representa el valor medio de la i-ésima banda fusionada filtrada.

PANi(j) representa el valor del pixel j de la i-ésima banda pancromática.

PANi representa el valor medio de la i-ésima banda pancromática. Como se puede observar en la anterior formula, el índice de Zhou puede interpretarse como el cálculo del cociente de correlación de las imágenes fusionada y pancromática tras haber sido aplicado a ambas imágenes un filtro laplaciano.

La principal desventaja de este índice reside en su rápida convergencia, de tal forma que para cualquier imagen fusionada de una calidad razonable se obtendrá un valor elevado, lo que ocasiona que las diferencias de índices en este tipo de imágenes sean prácticamente despreciables.

### □ Ergas Espectral.

El índice Ergas espectral, nace de la necesidad de obtener un valor cuantitativo que cumpliera tres condiciones:

- Ser independiente de las unidades (existen métodos de fusión que operan con radiancias, con valores digitales, . . .).
- Ser independiente del número de bandas multiespectrales.
- Ser independiente de la escala (h y l) para permitir comparar resultados en diferentes casos.

El índice ERGAS surge como un sustituto razonable del RMSE, el cual no cumple dichas condiciones, y viene determinado por el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$RMSE_{espectral}(Band^i) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^k (MULTI^i(j) - FUS^i(j))^2}{k}}$$

(Fórmula n°32)

Donde:

k es el número de píxeles de la imagen fusionada.

FUSi representa la i-ésima banda de la imagen fusionada.

$$ERGAS_{espectral} = 100 \frac{h}{l} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{(RMSE_{espectral}(Band^i))}{(MULTI^i)^2} \right)}$$

(Fórmula n°33)

Donde:

h y l representan la resolución espacial de las imágenes PAN y MULTI respectivamente.

n es el número de bandas de la imagen fusionada.

MULTIi son los valores de radiancia de la banda i de la imagen multiespectral.

#### □ Ergas Espacial.

El ERGAS espacial es una propuesta para poder utilizar el índice ERGAS tomando como referencia la imagen pancromática en lugar de la multiespectral. De tal forma que analógicamente se utilizan las ecuaciones:

$$RMSE_{espacial}(Band^i) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^k (PAN^i(j) - FUS^i(j))^2}{k}}$$

(Fórmula n°34)

Donde:

k es el número de píxeles de la imagen fusionada.

FUSi representa la i-ésima banda de la imagen fusionada.

$$ERGAS_{espacial} = 100 \frac{h}{l} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{(RMSE_{espectral}(Band^i))}{(PAN^i)^2} \right)}$$

(Fórmula n°35)

Donde:

h y l representan la resolución espacial de las imágenes PAN y MULTI respectivamente.

n es el número de bandas de la imagen fusionada.

PANi son los valores de radiancia de la banda pancromática igualada al histograma de la banda multiespectral i.

Como detalle en el proceso de implementación es recomendable igualar el histograma de la imagen pancromática al de la imagen fusionada.

### □ ERGAS Promedio.

Permite tomar como referencia el ERGAS espacial y espectral, de forma que se obtiene un único índice capaz de medir tanto la resolución espectral como la espacial:

$$ERGAS = \frac{ERGAS_{espectral} + ERGAS_{espacial}}{2}$$

(Fórmula nº36)

Nótese que dado que este algoritmo valora por igual los criterios de espacialidad y de espectralidad, no permite determinar el grado de compromiso entre ambos tipo de resolución. Así pues, podrán obtenerse fácilmente valores razonables con tan solo aumentar uno de los dos términos, algo que por norma general no será lo deseable.

### □ Diferencia de ERGAS.

Toma los ERGAS espectral y espacial como referencia, y surge como solución a encontrar un algoritmo capaz de contrastar tanto la resolución espectral como la resolución espacial de la imagen fusionada. La diferencia de ERGAS se define como:

$$ERGAS = |ERGAS_{espectral} - ERGAS_{espacial}|$$

(Fórmula nº37)

Se fundamenta en el hecho de que la calidad espectral de y la calidad espacial en el proceso de una fusión son variables suplementarias, y por tanto el incremento de una irá en detrimento de la otra (gura 2.21). Se considerara como valor de compromiso aquel que haga a ambos criterios máximos, de ah'' que se defina como la diferencia entre ambos ERGAS.

Por otro lado, eliminando el valor absoluto de la ecuación se podrá obtener el mismo índice pero con signo, algo especialmente útil a la hora de utilizar este índice en algún proceso de cálculo de parámetros óptimos, ya que permite agilizar la búsqueda utilizándolo como referencia para mejorar la dirección de los factores de compromiso.

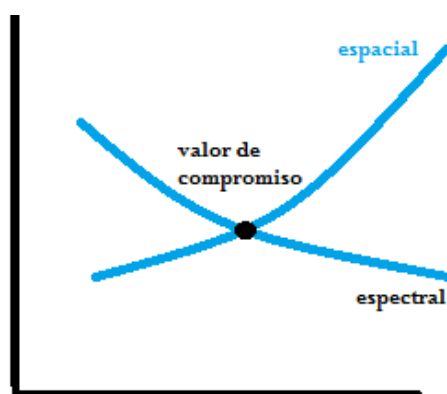


Fig.3.11 Factor de Compromiso (Fuente: imágenes Google)

### □ Índice QU (Universal image quality index).

También conocido como índice Q o índice QU. Pretende paliar algunas carencias del índice RMSE, necesidades entre las que cabe destacar:

- Pérdida de correlación.
- Distorsión lumínica.
- Distorsión del contraste.

El índice Q viene dado por la ecuación:

$$Q = \frac{4\sigma_{xy} * \bar{x} * \bar{y}}{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)[(x)^2 + (y)^2]}$$

(Fórmula nº38)

También se expresa como el producto de 3 términos:

$$Q = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x * \sigma_y} * \frac{2\bar{x} * \bar{y}}{[(x)^2 + (x)^2]} * \frac{2\sigma_z\sigma_y}{(\sigma_z^2 + \sigma_y^2)}$$

(Fórmula nº39)

Donde se puede observar que el primero de los términos se corresponde con el coeficiente de correlación (CC) y oscilará entre el rango [-1; 1]. El segundo término se encarga de medir la diferencia de luminancia entre x e y cuyos valores estarán comprendidos en el rango [0; 1]. Por último el tercer término es una aproximación que permite medir las similitudes del contraste de las imágenes, cuyo resultado vendrá dado en el rango [0; 1].

El algoritmo original propuesto opera mediante un proceso de ventaneado, el cual permitirá obtener un índice por cada bloque a procesar (mapa Q), de tal forma que el índice resultante será la media de todos los índices parciales:

$$Q = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m Q_j$$

(Fórmula nº40)

La complejidad computacional dependerá principalmente de:

- Tamaño de la ventana.
- Tamaño del desplazamiento, siendo d = 1 equivalente a una convolución.
- Tamaño de la imagen.

### □ Índice Q4 (basado en la teoría de los cuaterniones).

El Q4 es un índice de calidad cuya pretensión es obtener un índice que refleje los siguientes aspectos de las imágenes fusionadas:

- Distorsiones espectrales y radiométricas.
- Cambios en el contraste.
- Pérdida de correlación entre las bandas individuales.



Su fundamento teórico reside en la teoría de los Cuaterniones y permite la obtención de un único índice (de rango  $[0; 1]$ ) a partir de 4 bandas fusionadas distintas. El valor de índice vendrá dado por la siguiente expresión matemática:

$$Q4 = \frac{4|\sigma_{z_1 z_2}| * |\overline{Z_1}| * |\overline{Z_2}|}{(\sigma_{z_1}^2 + \sigma_{z_2}^2)(|\overline{Z_1}|^2 + |\overline{Z_2}|^2)}$$

(Fórmula nº41)

Al igual que ocurre con el índice Q, el índice Q4 puede expresarse como el producto de tres términos para una mejor comprensión:

$$Q4 = \frac{\sigma_{z_1 z_2}}{\sigma_{z_1} \sigma_{z_2}} * \frac{2\sigma_{z_1} \sigma_{z_2}}{\sigma_{z_1}^2 + \sigma_{z_2}^2} * \frac{2|\overline{Z_1}| |\overline{Z_2}|}{|\overline{Z_1}|^2 + |\overline{Z_2}|^2}$$

(Fórmula nº42)

El primero de los términos representa el modulo del coeficiente de correlación hipercomplejo, el cual es sensible a la pérdida de correlación y a la distorsión espectral. El segundo término de la ecuación proporcionará una medida de los cambios de contrastes de todas las bandas de forma simultánea, mientras que el tercer término analiza las medias.

El modo habitual de operación, el descrito en la literatura, consiste en un proceso de ventaneado de forma similar al descrito en el índice Q. Es por ello que la complejidad computacional dependerá tanto del tamaño de la ventana como del desplazamiento y del tamaño de imagen.





## Capítulo 4. MÉTODOS DE ANÁLISIS MULTITEMPORAL.

Una de las aportaciones más destacadas de la teledetección espacial al estudio del medio ambiente es su capacidad para seguir procesos dinámicos, ya que las imágenes se captan por un sensor que observa la Tierra desde una órbita estable y repetitiva.

El creciente énfasis en las aplicaciones medioambientales de la teledetección está subrayando la importancia de la dimensión temporal, puesto que para prevenir y evaluar una amplia variedad de fenómenos es pieza clave el seguimiento de su dinámica. El elenco de eventos es muy amplio. Puede tratarse de sucesos esporádicos (erupciones, incendios) o de procesos continuos (deforestación), ya sean naturales (inundaciones) o causados directamente por la actividad humana (vertidos incontrolados). Su ciclo también es muy variado, desde horas (seguimiento de un huracán, por ejemplo) hasta meses o años (desertificación).

Cuando se trata de determinar los cambios producidos entre dos fechas de referencia, de cara a evaluar la dinámica a largo plazo de un determinado fenómeno (crecimiento urbano, desforestación, expansión agrícola), las imágenes suelen adquirirse con un cierto lapso temporal (varios años), pero en la misma época del año, de cara a minimizar el efecto de factores externos al cambio. La cadencia en el seguimiento de estos procesos depende principalmente de su dinamismo. La evaluación de los efectos de un incendio o erupción volcánica requieren un período corto de tiempo, con objeto de paliar sus consecuencias más negativas; los cambios agrícolas precisan una estimación anual, mientras los urbanos pueden hacerse cada cinco o diez años.

### 4.1 TÉCNICAS DE DETECCIÓN DE CAMBIOS.

La detección automática de cambios es una técnica que se basa en la comparación de un conjunto de imágenes de la misma zona, tomadas en diferentes fechas identificando zonas con cambios significativos, siendo precisamente el objetivo la búsqueda de un algoritmo que extraiga esos cambios.

#### 4.1.1 Métodos cualitativos.

##### ❑ Composiciones multitemporales.

Esta técnica de detección se basa en generar una composición en color formada por imágenes correspondientes a distintas fechas, tras aplicarle algún realce del color.

Una muy común es asignar el cañón rojo a la primera fecha y el verde a la segunda, dejando el azul vacío. En consecuencia, aparecerán en tono amarillo las áreas estables, en rojos las zonas que hayan reducido su nivel digital entre fechas, y en verde las que no hayan ganado.

Puede realizarse sobre bandas originales o sobre bandas derivadas de ellas, como serían los componentes principales o índices de vegetación. El método resulta bastante sencillo y tiene la ventaja de incorporar el conocimiento y los criterios de análisis visual, lo que resulta muy ventajoso en categorías urbanas.

##### ❑ Componentes principales.

Habitualmente el análisis de componentes principales (ACP) se emplea para sintetizar información, eliminando la redundante en un conjunto de variables. En lo que atañe a su empleo en teledetección, el ACP suele emplearse para generar bandas no correlacionadas, de cara a mejorar la interpretación visual o la clasificación.



En esos casos, interesa resaltar los primeros componentes, que serán los que cuenten con mayor información común a las fechas que se estén analizando; esto es, la estable. Por su parte, los componentes inferiores ofrecen la información no común: el cambio, que es precisamente los que más interesa en este contexto.

El ACP se ha utilizado frecuentemente en detección de cambios, de cara a delimitar tendencias de crecimiento urbano, cambio en la cobertura del suelo, tasas de deforestación tropical y cartografía de áreas quemadas.

#### 4.1.2 Métodos cuantitativos.

##### □ NDVI

Prácticamente desde el lanzamiento de los primeros satélites de observación de la Tierra, se ha realizado un gran esfuerzo para estudiar el estado y dinámica de la vegetación por medio de los índices de vegetación (IVs). Se han desarrollado diferentes IVs, basados en la combinación de dos o más bandas espectrales, partiendo del hecho de que el análisis multibanda podría proporcionar más información que el monobanda.

La mayoría de los IVs utilizan la radiancia, la reflectividad a nivel del suelo, o la reflectividad aparente al exterior de la atmósfera.

Se ha demostrado que los valores de las bandas del Rojo (R) y del Infrarrojo Próximo (NIR) son los que más relacionados están con diferentes parámetros relativos a la vegetación, tales como biomasa verde, concentración de clorofila. Han demostrado su utilidad para diferentes tipos de análisis sobre las imágenes como clasificación de cultivos, fenología, cubierta verde y detección de cambios.

Conforme, sobre un suelo desnudo, se va desarrollando la vegetación, disminuye la reflectividad en el rojo y aumenta la del infrarrojo próximo. A causa de lo anterior, en el espacio citado, los valores correspondientes a tales coberturas, se van alejando de la línea de suelo, perpendicularmente a ella y hacia la parte superior.

El IV más ampliamente utilizado es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) formulado por (Rouse, Haas, Schell, Deering & Harlan, 1974) y que se expresa de la siguiente forma:

$$NDVI = (\rho_{IRp} - \rho_R) / (\rho_{IRp} + \rho_R)$$

(Fórmula nº43)

Este índice, al igual que sus modificaciones se basa en la diferencia entre la máxima absorción de radiación en el rojo a causa de los pigmentos clorofílicos y la máxima reflexión de radiación en el NIR debido a la estructura celular de la hoja y al hecho de que el suelo desnudo, carente de estos mecanismos, no muestra una diferencia espectral tan dramática, el rango de variación queda comprendido entre -1 y +1.

A pesar de la gran utilización del NDVI y su variedad de aplicaciones, se conocen varios inconvenientes del mismo. Entre estos se han citado, por varios autores, la sensibilidad respecto del tipo de suelo subyacente (especialmente el oscuro y/o húmedo).

Otro inconveniente es el hecho de que se alcanza su saturación a partir de un cierto grado de cobertura vegetal. También, su sensibilidad respecto de las condiciones atmosféricas, ya que los aerosoles incrementan la reflectividad aparente en la banda del rojo dispersando la luz solar hacia el sensor y disminuyendo la reflectividad del NIR por absorción de radiación solar.

#### □ Diferencia o cociente entre imágenes

Tomando como base que la diferencia de imágenes consiste en una simple resta o cociente entre las imágenes de dos fechas, que permite discriminar aquellas zonas que han experimentado cambios entre esas fechas. Las zonas estables presentarán un valor cercano a cero, si se trata de una resta, y a 1 si se trata de un cociente, mientras las que hayan experimentado cambios ofrecerán valores significativamente distintos a esas cifras, marcándose además la dirección del cambio (positivos o negativos, mayores o menores a 1).

Los resultados serán guardados en una nueva imagen de cambios. Cuando los datos de 8 bits son analizados de esta manera, el rango potencial de valores de diferencia encontrados en la imagen de cambios es de -255 a 255.

#### □ Vectores multitemporales.

Es una técnica que intenta incorporar no sólo la importancia, sino también la dirección del cambio entre imágenes. Si lo que representamos es un eje bivariado de dos bandas originales (por ejemplo, la del infrarrojo cercano), cada píxel viene definido por un punto (localización de sus Niveles Digitales, ND, en las dos bandas). Si ese píxel cambia su cobertura entre dos fechas, también modificará su emplazamiento espectral.

La magnitud del cambio vendrá dado por la longitud del vector que separa ambos puntos, que puede obtenerse a partir de la distancia euclidiana entre las dos fechas consideradas:

$$d_{i,j,c} = \sqrt{(ND_{i,t1} - ND_{i,t2})^2 + (ND_{j,t1} - ND_{j,t2})^2}$$

(Fórmula nº44)

Donde dij,c indica la intensidad del cambio espectral en las bandas i,j entre los dos períodos considerados (t1 y t2). Por su parte, la dirección del cambio puede calcularse a partir del ángulo que forma el vector de cambio con la vertical ( $\alpha$ ):

$$\alpha = \arctg\left(\frac{ND_{j,t1} - ND_{j,t2}}{ND_{i,t1} - ND_{i,t2}}\right)$$

(Fórmula nº45)

Todos los métodos hasta aquí analizados facilitan imágenes “continuas” del cambio. En otras palabras, el resultado de los cálculos es una imagen en donde el valor de salida indica el grado de cambio, desde la mayor pérdida a la mayor ganancia, en una escala gradual.

## Capítulo 5. APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE FUSIÓN DE IMÁGENES A LA ACTUALIZACIÓN DE ENTIDADES CARTOGRÁFICAS.

### 5.1 SELECCIÓN DE LA ZONA DE IMÁGENES.

La obtención de imágenes del proyecto la realizamos a través de la organización científica U.S Geological Survey (USGS), la cual nos ofrece un amplio abanico de colecciones de imágenes de la Tierra.

Puesto que nos encontramos en Madrid, buscamos la opción más cercana y conocida que nos permita desarrollar mejor todos los objetivos del proyecto. Teniendo en cuenta esta condición y quedando limitados por las imágenes accesibles, el área de estudio elegida está ubicada en la zona Sureste de Madrid, concretamente en la zona de Arganda del Rey y sus alrededores.

Arganda del Rey es un municipio de la Comunidad de Madrid, situado en la subcomarca de la Alcarria de Alcalá (Comarca de Alcalá), en la zona central de España, contando con una aglomeración urbana de aproximadamente 55 506 habitantes (Instituto Nacional de Estadística, 2012).

Esta población enlaza con la ciudad de Madrid por la línea 9 de metro, por la autovía A-3 y por la autopista de peaje R-3.



Fig.5.1 Localización Arganda del Rey (Fuente: imágenes Google)



### 5.1.1 Infraestructuras

Arganda da nombre a la región vinícola del sureste de Madrid que engloba a 26 municipios, una de las tres subzonas en que se divide la Denominación de Origen Vinos de Madrid.

Constituye un punto neurálgico importante en el sureste de la Comunidad de Madrid, una ciudad comprometida con el pleno empleo estable. Entre sus objetivos a corto plazo, figura un apoyo municipal a la innovación tecnológica, el fomento de la I+D+i. y la recuperación del Plan Local de Comercio Exterior para la ayuda a la internacionalización de sus empresas y productos.

Todo ello hace de Arganda del Rey una localidad muy atractiva para potenciar la actividad industrial al estar dotada con una excelente red de comunicación por carretera para el transporte de mercancías, así como un transporte público de calidad para dar acceso a los trabajadores de las empresas de los polígonos.

Pero no es sólo industria sino que consta de áreas eminentemente agrícolas y naturales que ha sabido generar riqueza de sus cepas de uva y de sus olivos.

### 5.1.2 Geografía física de la comarca Arganda del Rey

Arganda del Rey está, en parte, englobado dentro del *Parque Regional del Sureste*, ocupando la zona sur, oeste y noroeste y haciendo de límite el propio casco urbano.

El objetivo de la denominación del Parque es proteger los elementos y ecosistemas de la fauna, la flora, el paisaje o el agua, y a su vez disminuir los niveles de contaminación atmosférica, acústica y del suelo.



Fig.5.2 Desembocadura del Manzanares en el Jarama con Arganda de fondo (Fuente: wikipedia)

*Dehesa del Carrascal* es la principal masa forestal de Arganda del Rey, con una extensión de 131 hectáreas. Situada al sur del municipio, delimitada al norte por el barrio de Los Almendros, al este con el camino de Los Jarales, al sur con la autovía A-3 y al oeste con la carretera comarcal C-300.

La zona pertenece al Parque Regional de los cursos medios de los ríos Jarama y Manzanares, pese a su relativo alejamiento respecto del eje del parque, pero incluido por su interés biológico. La importancia actualmente de la Dehesa radica en que se trata del último reducto del original bosque mediterráneo que poblaba el pueblo y la región.



Fig.5.3 Vista de la Dehesa del Carrascal (Fuente: wikipedia)

Otros parajes naturales a destacar en Arganda son las “Lagunas de las Madres” fruto de la extracción de áridos y las “Lagunas de la Esperilla”, reservas naturales situadas al oeste de Arganda, cerca de la carretera de Chinchón (M-506).

## 5.2 IMÁGENES.

### 5.2.1 Imágenes adquiridas.

Las imágenes que se han adquirido en este proyecto son las de las plataformas Landsat y Eo1, clasificadas por nombre, fecha, tipo de sensor, formato, resolución espacial y bandas.

Imagen	Fecha	Tipo (SENSOR)	Formato	Resolución espacial		Bandas
EO-1	19-oct-07	Ali	Tiff	PAN	10m	1
	27-may-03		IMG	XS	30m	9
Landsat 8	15-jun-13	Oli	Tiff	PAN	15m	1(b8)
			IMG	XS	30m	10
Landsat 7	25-jun-02	ETM+	Tiff	PAN	15m	1(b8)
			IMG	XS	30m	7

Tabla 6 Clasificación de las plataformas

A continuación se muestra las siguientes tablas indicando la longitud de onda y la resolución espacial de cada banda en cada uno de los sensores.

En Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), las imágenes constan de ocho bandas espectrales con una resolución espacial de 30 metros exceptuando la banda 6 que pertenece al infrarrojo térmico y que adquiere una resolución de 60 metros (que más tarde en Febrero de 2010, se muestrean a 30 metros píxeles) y la banda 8 que es la banda pancromática con una resolución de 15metros.

Estudio de un caso práctico.

Todas las bandas pueden recoger uno de los dos ajustes de ganancia (alta o baja) para una mayor radiometría y sensibilidad, mientras que la banda 6 recoge tanto de alta como de baja ganancia para todas las escenas.

Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	Bandas	Ancho de banda ( $\mu\text{m}$ )	Resol. Espacial (m)
	b1 Visible Azul	0,45-0,52	30
	b2 Visible Verde	0,52-0,60	30
	b3 Visible Rojo	0,63-0,69	30
	b4 NIR	0,77-0,90	30
	b5 SWIR	1,55-1,75	30
	b6 TIRS	10,40-12,50	60 * (30)
	b7 SWIR	2,09-2,35	30
	b8 Pancromático	0,52-0,90	15

Tabla 7 Esquema de bandas Landsat 7 ETM+

En este gráfico se muestran las bandas espectrales según los intervalos de longitud de onda:

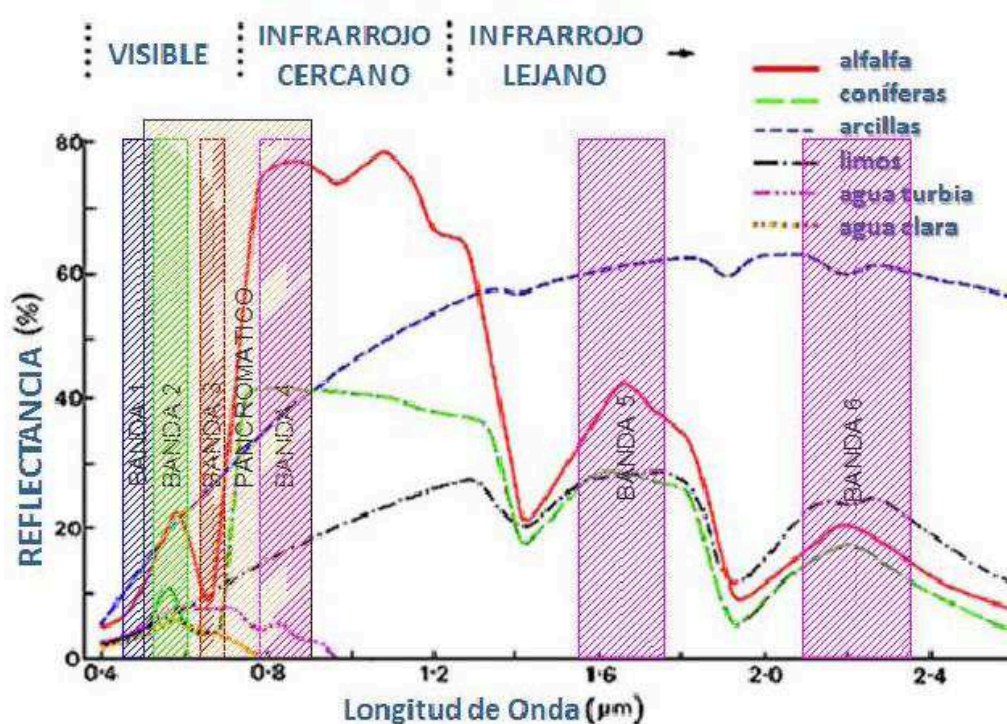


Fig.5.4 Gráfico de las bandas espectrales Landsat 7 ETM+

Las imágenes del Landsat 8 (OLI) constan de nueve bandas espectrales con una resolución espacial de 30 metros exceptuando la banda 8 pancromática con 15 metros.



Estudio de un caso práctico.

Las TIRS bandas 10 y 11 son bandas térmicas útiles para proporcionar más exactitud y cuyas temperaturas de la superficie se recogen en 100 metros de resolución aunque se muestrean a 30 metros para los datos del producto.

En cuanto a las bandas 1 y 9 son nuevas y útiles para los estudios costeros y aerosoles y para la detección de nubes respectivamente.

Landsat 8 Operational Land Imager (OLI)	Bandas	Ancho de banda ( $\mu\text{m}$ )	Resol. Espacial (m)
	b1 Aerosoles	0,43-0,45	30
	b2 Visible Azul	0,45-0,51	30
	b3 Visible Verde	0,53-0,59	30
	b4 Visible Rojo	0,64-0,67	30
	b5 NIR	0,85-0,88	30
	b6 SWIR 1	1,57-1,65	30
	b7 SWIR 2	2,11-2,29	30
	b8 Pancromático	0,50-0,68	15
	b9 Nubes	1,36-1,38	30
	b10 TIRS 1	10,60-11,19	100
	b11 TIRS 2	11,50-12,51	100

Tabla 8 Esquema de bandas Landsat 8 OLI

Y su respectivo gráfico de las bandas espectrales.

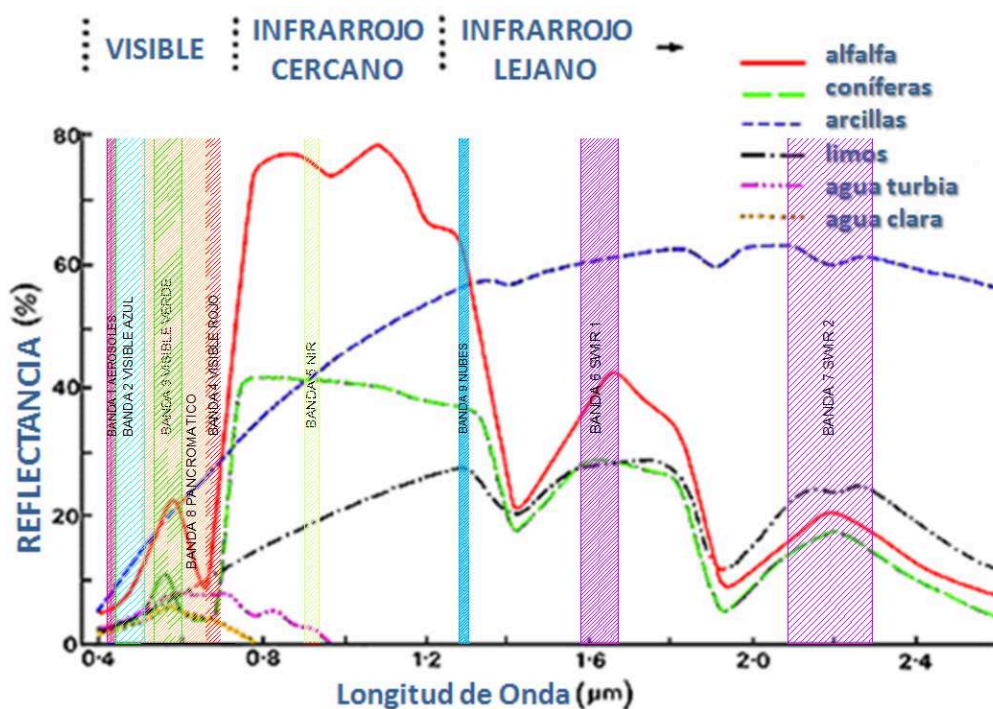


Fig.5.5 Gráfico de las bandas espectrales Landsat 8 OLI

El Eo-1 ALI se ha diseñado para imitar las seis bandas del Landsat 7 ETM+ con tres bandas adicionales más 1p, 4p y 5p. En definitiva, posee siete bandas incluida la pancromática en el VNIR y tres bandas espectrales en el SWIR.

	Bandas	Ancho de banda ( $\mu\text{m}$ )	Resol. Espacial (m)
<b>Eo-1 ALI</b>	b1p Visible Azul Continuo	0,433-0,453	30
	b1 Visible Azul Espectral	0,45-0,515	30
	b2 Visible Verde	0,525-0,605	30
	b3 Visible Rojo	0,633-0,69	30
	b4 NIR	0,775-0,805	30
	b4p NIR	0,845-0,805	30
	b5p SWIR	1,2-1,3	30
	b5 SWIR	1,55-1,75	30
	b7 SWIR	2,08-2,35	30
	Pancromático	0,48-0,69	10

Tabla 9 Esquema de bandas EO-1 ALI

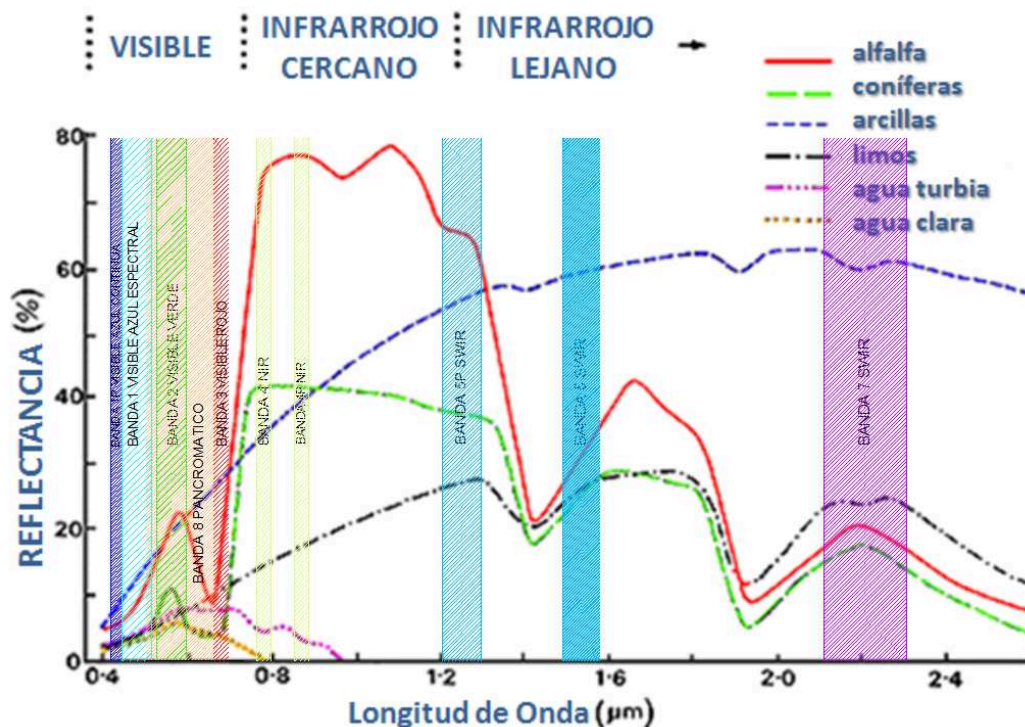


Fig.5.6 Gráfico de las bandas espectrales EO-1 ALI

### ❑ Elección de bandas

Dependiendo de la imagen, en el caso de Landsat 7, la composición de bandas RGB para los tres primeros métodos es en la combinación de color natural (3, 2, 1) y para Gram-Schmidt en falso color (5, 4, 3) ya que a nuestro parecer esta composición nos ayudara al posterior estudio de estas. En el caso de Landsat 8, la composición es en falso color infrarrojo (4, 3, 2) y con Gram-Schmidt utilizamos la misma composición que en el Landsat 7, (5, 4, 3).

## 5.2.2 Estado de las imágenes adquiridas.

Cada imagen descargada del USGS (United States Geological Survey) Earth Explorer lleva anexo un archivo que contiene toda la información sobre el estado en el que se encuentran.

Estas imágenes vienen corregidas radiométricamente y geométricamente, por lo que no le aplicamos ninguna de estas correcciones.

Geográficamente se disponen en la proyección UTM (Universal Transversa Mercator), cuyo elipsoide utilizado es el WGS84 y en el huso 30 N.

General	Projection	Histogram	Pixel data
Projection Type: UTM			
Spheroid Name:	WGS 84		
Spheroid Axis:	6378137.000000, 6356752.314245		
Datum Name:	WGS 84		
Datum Parameters:	0.000000, 0.000000, 0.000000, 0.000000, 0.000000		
UTM Zone:	30		
NORTH or SOUTH:	North		

Fig.5.7 Características de la proyección (Fuente: captura de imagen del programa Erdas)

A la hora de descargar las imágenes, las bandas de las multiespectrales vienen separadas, por lo que tenemos que solaparlas en una sola imagen.

Al trabajar tanto con las imágenes Landsat como Eo-1, nos hemos dado cuenta de que las Landsat son adquiridas en el mes de Junio con 10 días de diferencia entre el año 2002 y 2013 y las Eo-1 son adquiridas en Octubre y en Mayo de diferentes años. Al no coincidir ésta última con el mes, no podemos seguir trabajando con ellas, ya que las diferencias son tales como las distintas épocas del año, la vegetación, las precipitaciones, el clima, etc.

## 5.3 APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE FUSIÓN.

### 5.3.1 Imágenes Landsat.

Tanto en las imágenes pancromáticas como multiespectrales del Landsat 7 y 8, las resoluciones de éstas son distintas; por lo que primeramente pasamos todas a una misma resolución de 8 bits y así poder trabajar más fácilmente con ellas. También hemos realizado un recorte de la zona que nos interesa.

Estos dos pasos nos han servido para reducir el peso de la imagen y desechar la información redundante.

A continuación, procedemos a aplicar los métodos de fusión. En nuestro trabajo, utilizaremos cuatros de los distintos métodos que existen: PCA, Brovey, Wavelet y Gram Schmidt.

Los tres primeros métodos de integración se han realizado con el programa Erdas y sólo el último con el programa Envi.

Para realizarlos, utilizamos la imagen pancromática por un lado y la imagen multiespectral por otro; en donde crearemos un fichero de salida que será la imagen fusionada, teniendo en cuenta que la imagen final debe tener las mismas características que las originales.

#### □ Con Erdas:

Hallamos el análisis de componentes principales (PCA) mediante el método de convolución cúbica.

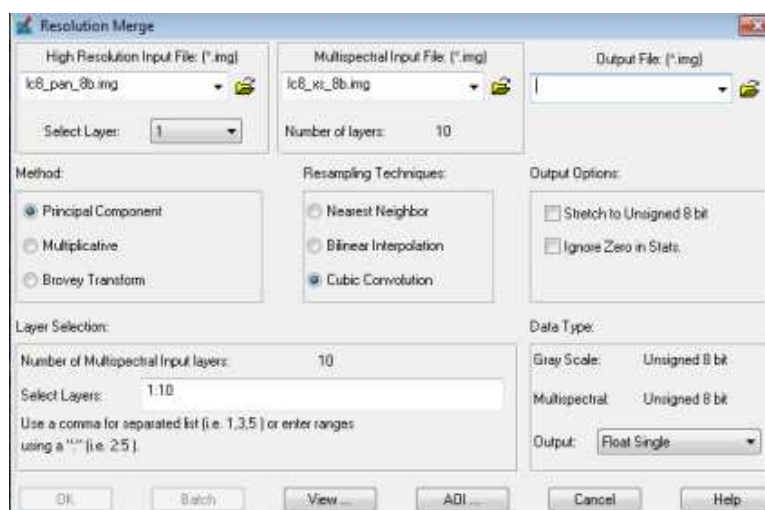


Fig.5.8 Captura del proceso Pca por el programa Erdas

Del mismo modo realizaremos este paso con Brovey, por el método de Interpolación bilineal y Wavelet, por el vecino más próximo. De tal manera, obtenemos las respectivas imágenes. Para una mejor visualización hemos hecho captura de la imagen fusionada obtenida y de una zona con más aumento de la misma.



PCA:



Fig.5.9 Fusión por componentes principales

BROVEY:



Fig.5.10 Fusión por brovey

WAVELET:



Fig.5.11 Fusión por wavelet



## □ Con Envi:

El método de Gram-Schmidt lo obtendremos utilizando el programa Envi. Este programa no trabaja en formato .img, por lo que tuvimos que pasarlo a formato .tiff.

## GRAM SCHMIDT:



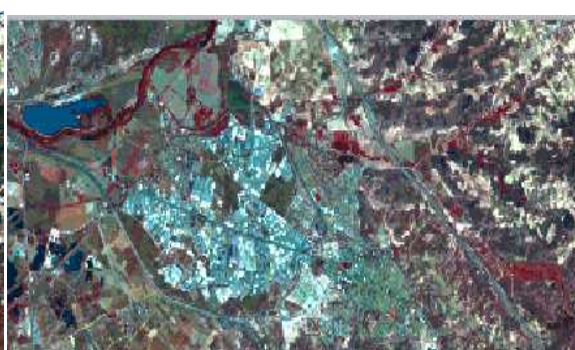
Fig.5.12 Fusión por Gram-Schmidt

Se muestra aquí la visualización de las imágenes fusionadas por los cuatro métodos utilizados:

## PCA



## Brovey



## Wavelet



## Gram Smchidt

Fig.5.13 Visualización de los cuatro métodos de fusión



### 5.3.2 Remuestreo.

Una vez obtenidas las imágenes fusionadas el siguiente paso es el remuestreo de las mismas; para que la imagen fusionada (15x15 píxeles) tenga el mismo tamaño que la original multispectral (30x30 píxeles), por ello, se debe realizar este proceso.

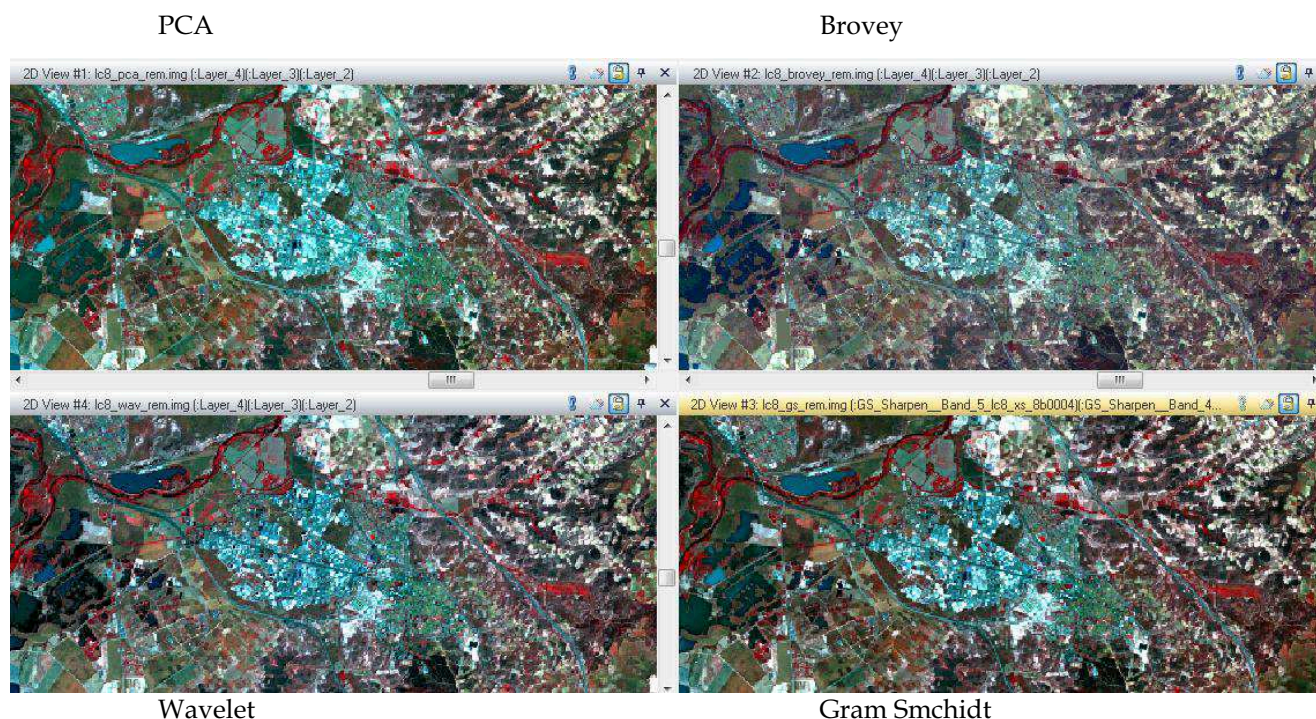


Fig.5.14 Visualización del remuestreo de los cuatro métodos de fusión

## 5.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

### 5.4.1 Análisis visual.

Este procedimiento se realizará de manera visual, mediante una correcta visualización de las imágenes ya generadas anteriormente.

Primeramente cargamos las imágenes en el programa ERDAS, utilizando una composición de bandas específica para este trabajo de visualización. En nuestro caso, como ya se ha comentado anteriormente en el capítulo 3.4.1, su composición será la de falso color.

Para que nos sea más fácil la comparación de las imágenes, agruparemos en la misma pantalla las cuatro ventanas con las diferentes fusiones en cada una de ellas. Este procedimiento de manera cualitativa no nos es del todo válido para un análisis correcto ya que necesitamos una posterior comprobación mediante los métodos cuantitativos.



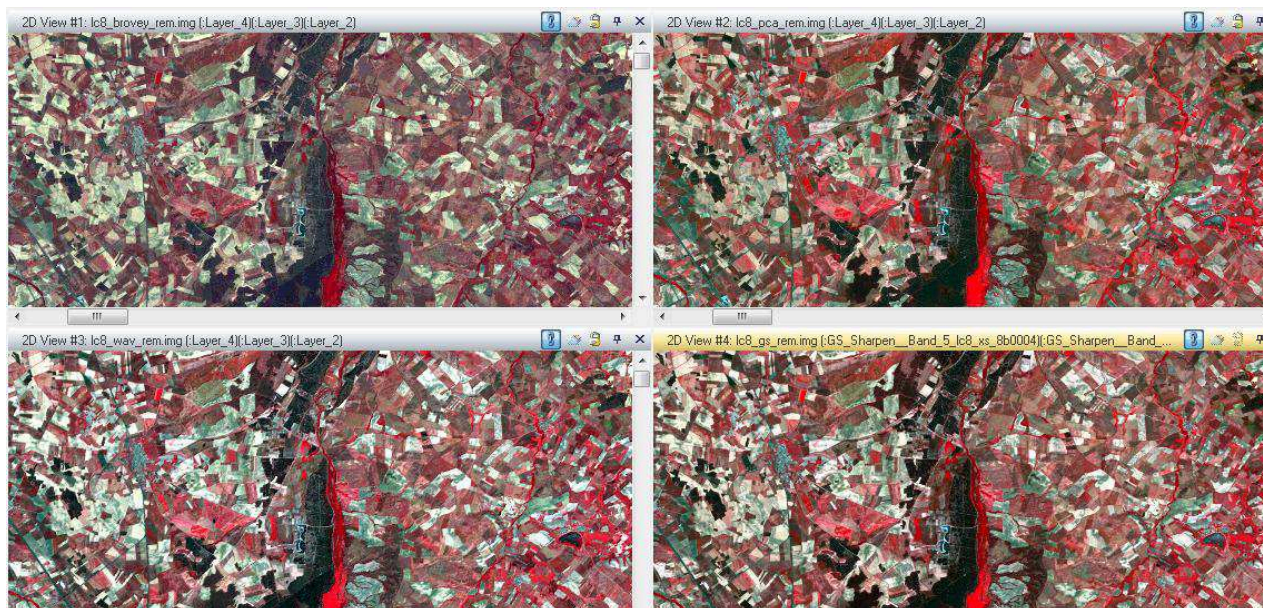


Fig.5.15 Visualización de las cuatro fusiones aplicadas

## 5.4.2 Coeficiente de correlación.

El coeficiente de correlación como técnica estadística que es, es necesario la obtención de una serie de valores que nos aporta la imagen. Para ello, necesitaremos analizar de cada imagen los parámetros de sus bandas.

La composición de cada banda de la imagen multispectral con la banda de la imagen fusionada genera una imagen de dos bandas. La primera banda será la correspondiente con la imagen original (multispectral) y la segunda será la banda de la imagen fusionada.

Este procedimiento lo realizaremos en cada una de las bandas que nos interesen en cada estudio.

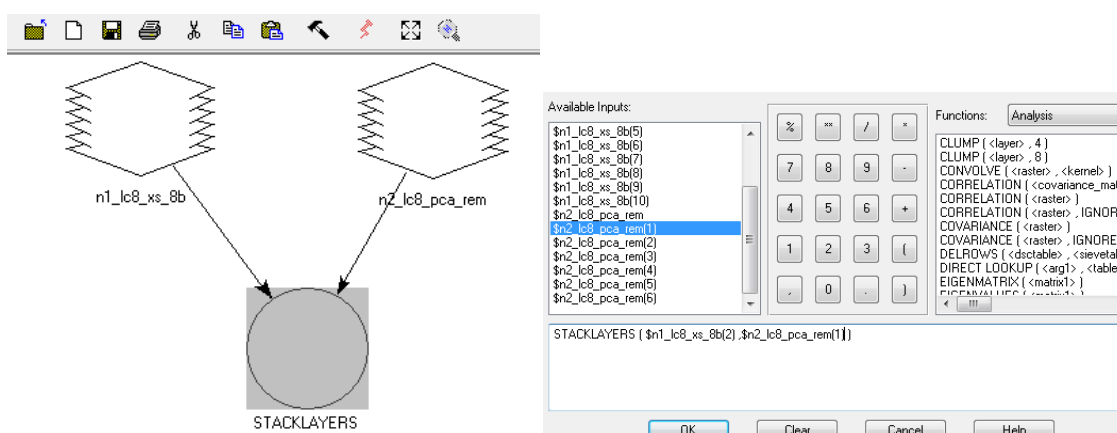


Fig.5.16 Diagrama del coeficiente de correlación

Una vez obtenida la imagen comparación, por la composición de ambas imágenes (multiespectral y fusionada de cada banda por separado) podremos lograr una serie de parámetros tanto gráficos como numéricos.

En primer lugar, si hablamos gráficamente, obtendremos los llamados gráficos de regresión que toda imagen tiene y en los cuales se puede observar con total claridad la llamada recta de regresión, que nos define la calidad que tiene la imagen.



Fig.5.17 Gráfica de regresión

Para hallar los parámetros numéricos de la recta de regresión de forma precisa, nos basaremos en una serie de matrices, tanto la matriz covarianza como la matriz correlación, calculadas por una serie de operaciones aplicadas a cada imagen de comparación.

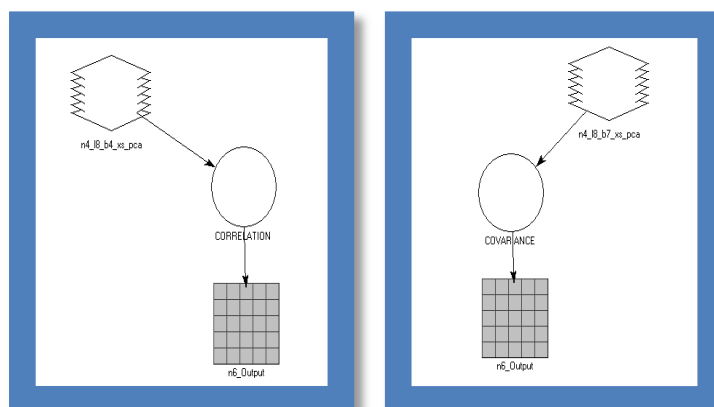


Fig.5.18 Diagrama del cálculo de los parámetros numéricos

Una vez obtenidas las matrices tenemos que saber identificar los parámetros que estas nos dan:

- La matriz correlación: 
$$\begin{bmatrix} \cong 1 & x \\ x & \cong 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Fórmula n°46})$$

Donde:

Los valores  $\cong 1$  son los que marcan la pendiente de la recta. (Al acercarse a 1, la pendiente será aproximadamente 45°, cuyo caso sería la recta ideal).

El valor de x es el parámetro que marca la correlación de la imagen.

Estudio de un caso práctico.

➤ La matriz covarianza: 
$$\begin{bmatrix} \sigma_{I_0}^2 & \sigma_{I_0 I_t} \\ \sigma_{I_0 I_t} & \sigma_{I_t}^2 \end{bmatrix}$$
 (Fórmula nº47)

Donde:

El valor  $\sigma_{I_0 I_t}$  pertenece a la covarianza.

El valor  $\sigma_{I_0}^2$  pertenece a la varianza de la imagen original (multiespectral) con lo cual el

valor  $\sigma_{I_t}^2$  pertenecerá a la varianza de la imagen transformada (fusionada).

Estas matrices sirven para obtener de manera numérica la recta de regresión, cuya fórmula es:

$$Y = a * X + b$$

(Fórmula nº48)

De la cual el parámetro “a” y “b” se obtienen de la siguiente forma:

$$a = \frac{\sigma_{I_0 I_t}}{\sigma_{I_0}^2} ; \quad b = \mu_{I_t} - a * \mu_{I_0}$$

(Fórmula nº49)

El parámetro “a” se puede calcular de manera directa gracias a los valores de la matriz covarianza; sin embargo, para el cálculo del parámetro “b” necesitaremos las medias de las dos bandas de cada imagen, cuya ubicación está en el metadata de cada imagen.

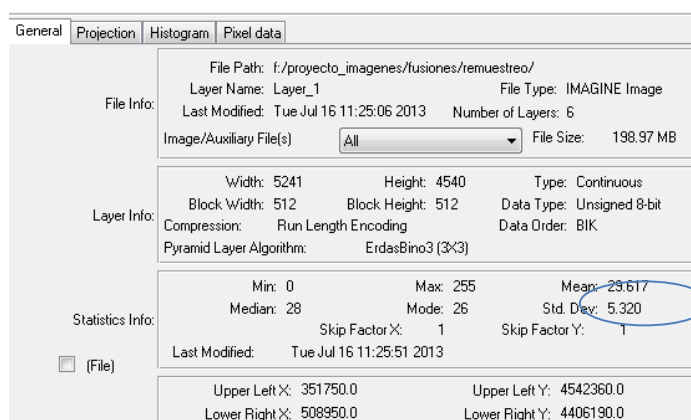


Fig.5.19 Metadata de la imagen

Finalmente para obtener los valores de Y de la recta, daremos valores a X. En nuestro caso, realizaremos el trazado de la recta con estos tres valores, X=0, X=50 y X=200. Los cálculos los realizamos en una tabla Excel que se adjunta al documento en el anexo III.

LANDSAT 8									
Algoritmo de fusión	Bandas	Varianza Imagen Original(X)	Varianza Imagen Transformada(Y)	Parámetro Covarianza	Parámetro Correlación	a	Media It	Media Io	b
WAVELET	B2	29,59687232	30,90941029	29,46916545	0,974315402	0,995685123	40,494	41,172	-0,50034788
	B3	52,40090051	54,95708115	52,1240637	0,971308216	0,994716946	41,225	41,976	-0,529238508
	B4	118,7207522	124,5420723	117,971231	0,970185429	0,993686688	43,904	44,792	-0,605214139
	B5	133,1137359	134,9825127	132,3582729	0,987417685	0,994324681	72,45	73,212	-0,346498512
	B6	249,0323167	259,3867256	246,265592	0,968951432	0,988890098	67,336	68,405	-0,309027121
	B7	199,903932	207,8846638	197,6342177	0,969483105	0,988645975	50,885	51,892	-0,41781692

Fig.5.20 Cálculos para la recta de regresión en el Landsat 8

Con todos los datos hallados, ya podemos dibujar las rectas sobre las gráficas de regresión.

En la figura 5.21 se muestran los resultados del análisis de correlación para los sistemas Landsat 7 y 8 y el método Wavelet.

Tanto en las gráficas de manera visual como en la tabla, observamos que los resultados de mayor precisión son los alcanzados por el algoritmo Wavelet, ya que su pendiente es muy próxima a 1 como se puede visualizar en las siguientes imágenes.

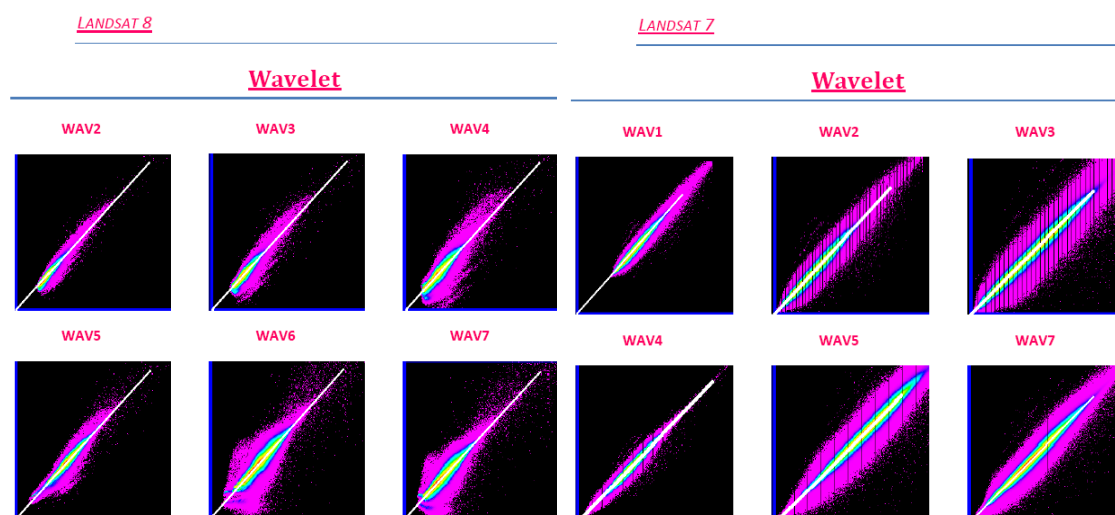


Fig.5.21 Gráficas de las rectas de regresión por el algoritmo Wavelet

### 5.4.3 RMSE.

Esta función estadística permite obtener el error producido entre la estimación de los valores de la imagen multiespectral y de la imagen fusionada. Recordando la fórmula:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (MS_{kl}(i) - MS'_{kl}(i))^2}{n}}$$

(Fórmula nº50)

Dónde:

- $n$  es el número de píxeles.
- $MS_{kl}$  es la imagen original para la banda  $k$ .
- $MS'_{kl}$  es la imagen fusionada, banda  $k$ .

En primer lugar, seleccionamos la imagen multiespectral y la imagen fusionada remuestreada de las cuatro fusiones correspondientes. Este proceso, lo haremos tanto para Landsat 7 como para el 8.

Para ello, construimos la ecuación con la ayuda del programa Erdas donde primeramente hacemos la resta de las imágenes elevándolas al cuadrado, luego las sumamos, las dividimos por el

número de píxeles y por último calculamos su raíz cuadrada. Estas operaciones se hacen para cada banda que nos interese de la imagen.

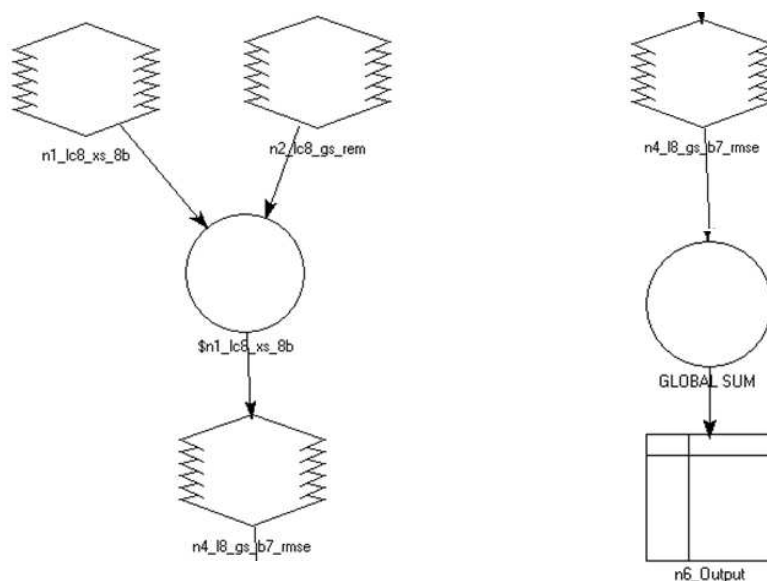


Fig.5.22 Proceso de la ecuación RMSE.

Los resultados obtenidos para ambos Landsat son los siguientes:

LANDSAT 8			LANDSAT 7		
Algoritmo de fusión	Bandas	RMSE	Algoritmo de fusión	Bandas	RMSE
PCA	B2	11,69	PCA	B1	8,36
	B3	15,29		B2	11,29
	B4	15,92		B3	13,18
	B5	15,49		B4	6,62
	B6	15,95		B5	12,84
	B7	15,94		B7	12,10
BROVEY	B2	15,96	BROVEY	B1	15,97
	B3	15,96		B2	15,91
	B4	15,96		B3	15,93
	B5	15,96		B4	15,95
	B6	15,96		B5	15,96
	B7	15,96		B7	15,97
WAVELET	B2	1,42	WAVELET	B1	2,71
	B3	1,90		B2	4,27
	B4	2,77		B3	6,42
	B5	1,97		B4	2,11
	B6	3,88		B5	5,90
	B7	3,51		B7	5,00
GRAN-SCHMIDT	B2	3,15	GRAN-SCHMIDT	B1	6,94
	B3	4,17		B2	9,25
	B4	5,82		B3	11,52
	B5	5,31		B4	6,42
	B6	7,75		B5	11,43
	B7	7,11		B7	10,68

Tabla 10 Resultados del RMSE



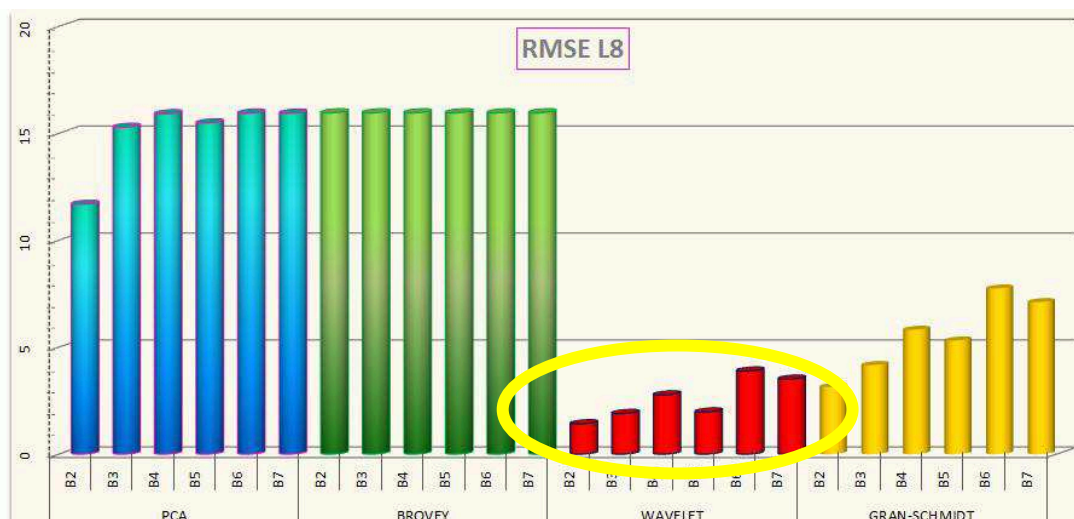


Fig.5.23 Gráfica de los resultados del RMSE

Como se puede observar en la tabla y en la gráfica, los mejores resultados son los que se obtienen por el método de fusión wavelet, ya que se aproximan más a cero, esto significa, que cuánto menor sea el número y más se aproxime a cero, menos cambios habrá.

## 5.5 DETECCIÓN DE CAMBIOS.

### 5.5.1 Deltacue.

El programa Deltacue se ha utilizado en este trabajo para analizar la detección de cambios sobre las imágenes de distintas fechas. Como resultado de esto, obtendremos unos índices de cambio visuales en las imágenes, que es nuestro fin.

Primeramente, seleccionamos la imagen fusionada de wavelet del Landsat 7, que será la imagen de referencia y la imagen fusionada de la fusión wavelet del Landsat 8, que será la imagen esclava.

Elegimos la fusión wavelet porque como ya hemos visto en el análisis anterior, es la que mejor resultados se obtienen.

Estas imágenes están co-registradas. La normalización radiométrica requerida para evitar falsas alarmas, se realiza en Deltacue.

Este programa calcula los índices de cambios mediante la siguiente ecuación:

$$CVA = \sqrt{(B_{1REF} - B_{1ESC})^2 + (B_{2REF} - B_{2ESC})^2 + \dots + (B_{nREF} - B_{nESC})^2}$$

(Fórmula nº 51)

Dónde:

$B_{1REF}$  banda 1 de la imagen de referencia

$B_{1ES}$  banda 1 de la imagen esclava

Aplicando la fórmula nº 51, se obtiene el denominado Índice de Cambio cuyos valores pueden representarse mediante un histograma. Estos valores son escalados en un rango  $[-1000, 1000]$  por el programa con el fin de identificar la dirección del cambio.

Para ello, utiliza también un código de color representado en la figura 5.24.

cambio	< -481
cambio	> 9240

Fig.5.24 Umbrales

Los umbrales indicados en la figura 5.24 representan los valores a partir de donde se debe considerar cambio o no.

En la figura 5.25 se puede observar el histograma para la elección de los umbrales.

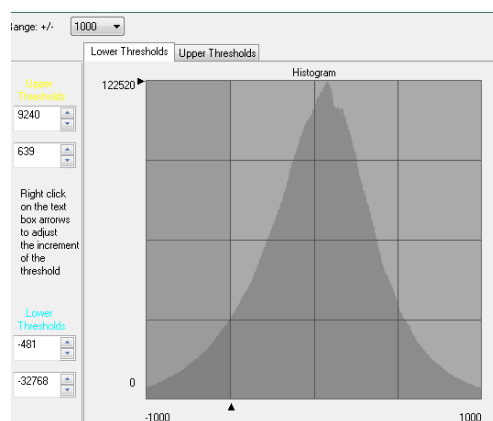


Fig.5.25 Histograma de los umbrales

Presentando así, la zona de la imagen en donde se refleja los mínimos y máximos valores de cambios.

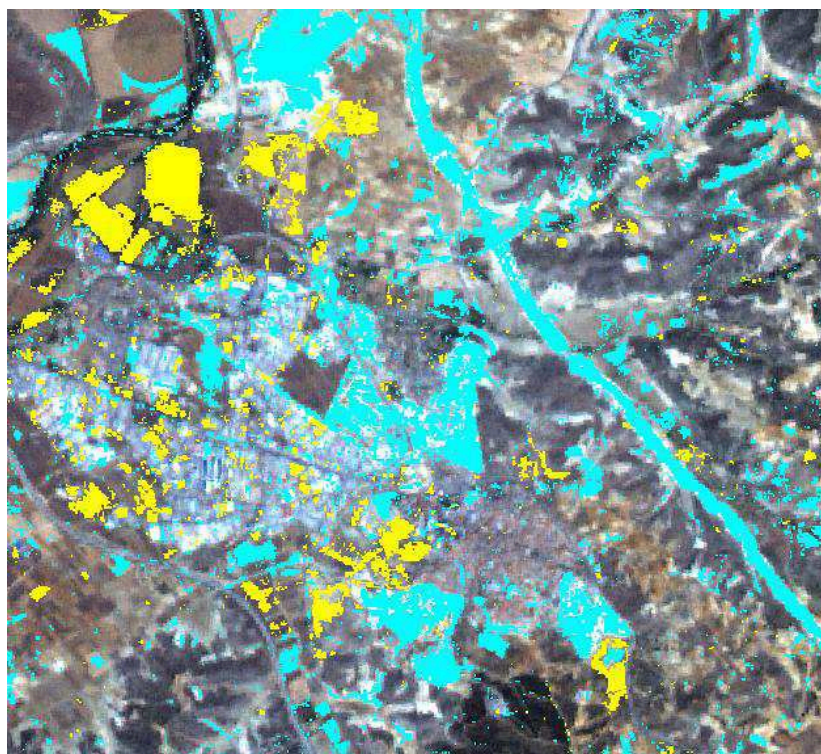


Fig.5.26 Imagen de los valores de los umbrales



## Estudio de un caso práctico.

Al realizar este paso, el programa nos genera varios ficheros. Entre ellos, una máscara de cambios que utilizaremos posteriormente para superponerla a la cartografía y las siguientes imágenes para ver de manera visual los cambios detectados.

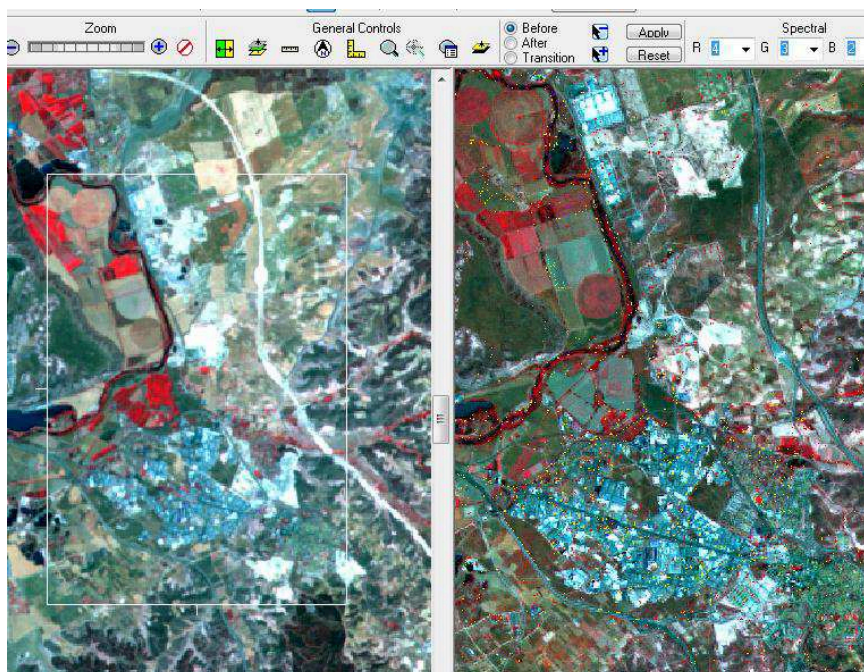


Fig.5.27 Imágenes con la detección de cambios.

### 5.5.2 Actualización cartográfica.

Para la actualización cartográfica, utilizamos la máscara de cambios en pseudocolor para que los cambios detectados aparezcan en un color violeta y los no cambios en visibilidad cero.

En esta imagen se visualiza de fondo la imagen referencia (Landsat 7) superpuesta con dicha máscara en la zona de Arganda del Rey y sus alrededores:

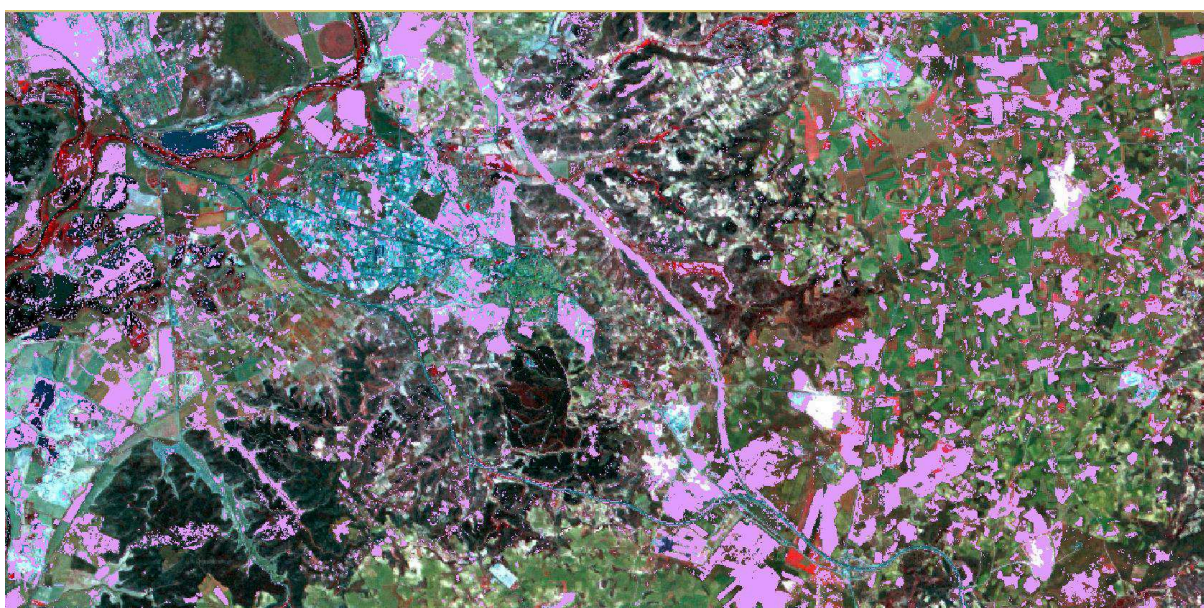


Fig.5.28 Máscara de cambios con el Landsat 7 en Arganda del Rey



## Estudio de un caso práctico.

Aparte de la zona de Arganda del Rey, nos ha llamado la atención otras zonas como la de Vallecas, concretamente el Ensanche de Vallecas que como se aprecia en la figura 5.29 ha evolucionado muy rápido todos estos años. Otra zona que nos ha llamado la atención es Ávila por los cambios que también se han producido, donde se puede ver en el anexo VI.

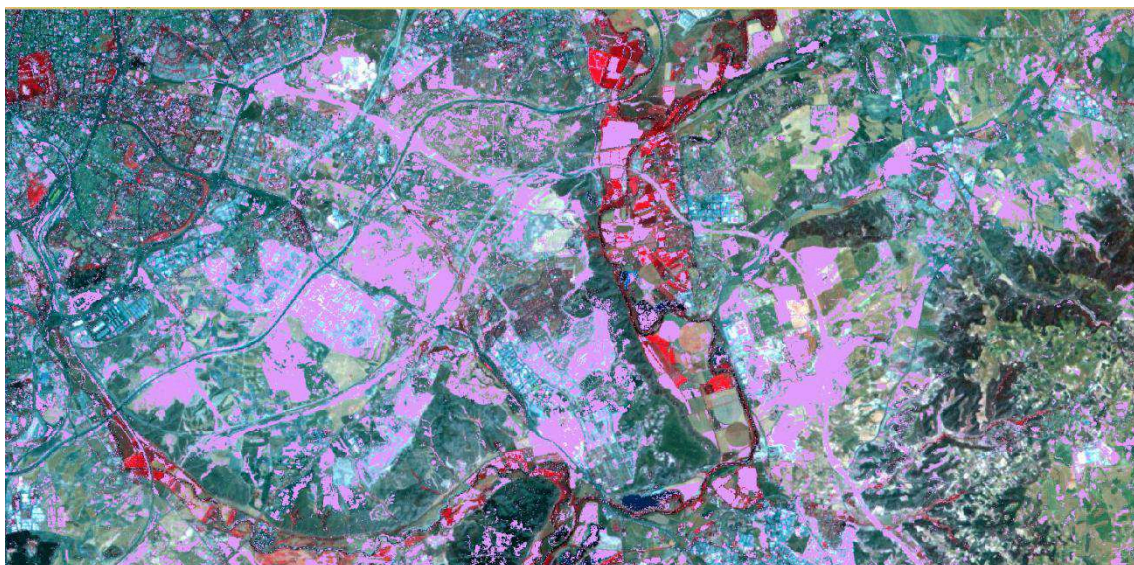


Fig.5.29 Máscara de cambios con el Landsat 7 en la zona del Ensanche de Vallecas

Todo este procedimiento es una ayuda para una futura actualización cartográfica. Para ello, hemos descargado la cartografía del IGN. Específicamente, la hoja 0583, huso 30, Sistema Geodésico de Referencia ETRS89 (compatible con WGS84) y proyección UTM



Fig.5.30 Mapa Topográfico Nacional escala 1:50.000, año 2002.



## Estudio de un caso práctico.

Como puede comprobarse en las figuras 5.28 y 5.30, el territorio ha sufrido una serie de cambios que no están representados en la última actualización cartográfica del año. Superponiendo esta cartografía y la máscara, se reflejan los cambios de la zona de trabajo (Arganda del Rey y alrededores). Con esto, podemos estimar de manera visual sobre la cartografía existente, las probables zonas dónde se han producido los cambios en dicho territorio, lo cual puede facilitar y optimizar las actuaciones de actualización.

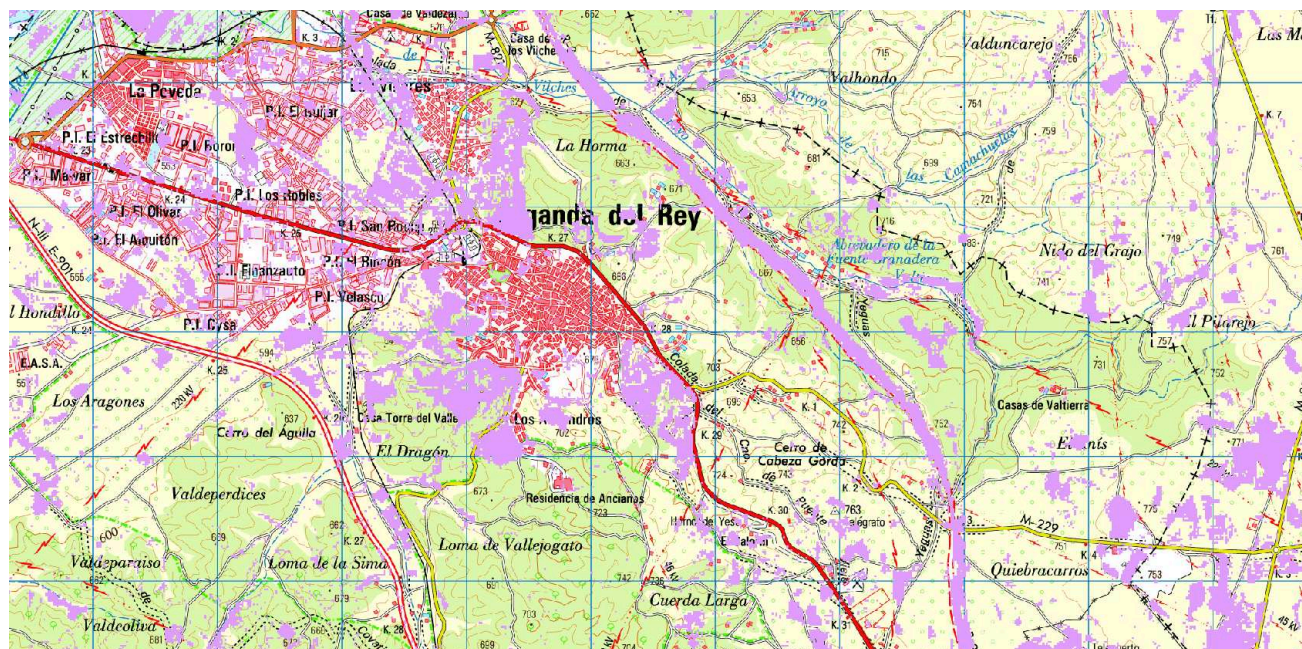


Fig.5.31 Máscara de cambios con MTN

### 5.5.3 Cartografía derivada.

A continuación, se muestra una de las cartografías derivadas, concretamente la máscara obtenida mediante los procesos de detección de cambios, superpuesta en el Mapa Topográfico Nacional; escala 1:50000; hoja 0583; huso 30.

Las demás cartografías se encuentran en el anexo VII.

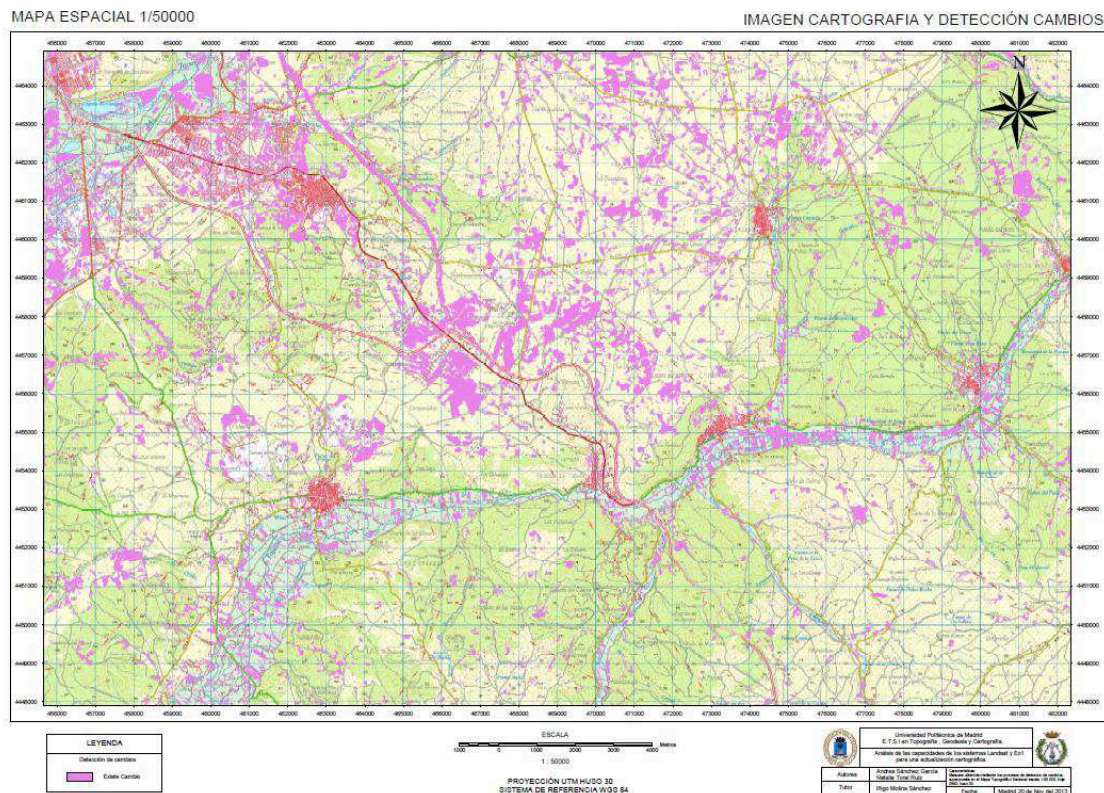


Fig.5.32 Cartografía derivada con máscara de cambios con MTN



## Capítulo 6. PRESUPUESTO

La elaboración de un presupuesto consiste en la valoración de los costes que se producen en la ejecución del trabajo.

Para la elaboración del presupuesto es necesario preparar el cronograma de actividades del proyecto, con los costes por tarea. Para ello, se determinará el coste de cada una de las actividades de acuerdo a la metodología establecida.

Id	Nombre de tarea	Costo total
8	Algoritmos de fusión	1.890,00 €
12	Métodos de fusión y métodos de	1.840,00 €
6	Plataformas, sensores y caracterí	1.680,00 €
5	Fundamentos	1.176,00 €
18	Redacción de la memoria y prepe	1.176,00 €
9	Métodos de análisis multitempor	1.008,00 €
13	Ánàlisis de los resultados	880,00 €
11	Tratamiento de las imágenes adq	460,00 €
14	Detección de cambios	440,00 €
16	Actualización cartográfica	440,00 €
3	Descarga de imágenes	252,00 €
2	Búsqueda del área de trabajo	92,00 €
		<b>11.334,00 €</b>

Fig.6.1 Tabla de tareas y costos

### Informe del costo previsto

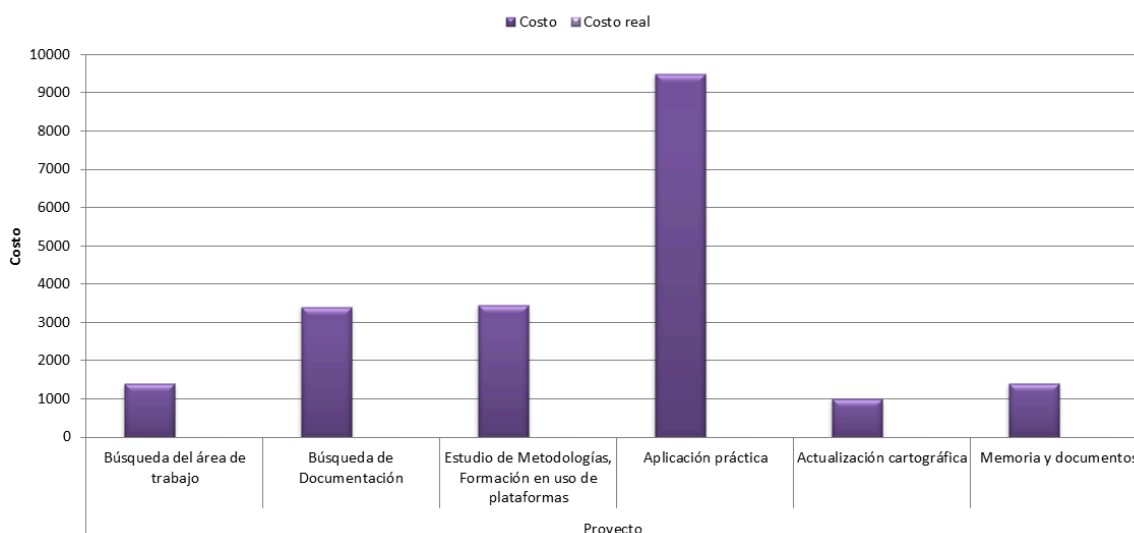


Fig.6.2 Informe del costo previsto



## BIBLIOGRAFÍA

### PÁGINAS DE INTERNET

<http://eo1.gsfc.nasa.gov/>

<http://earthexplorer.usgs.gov/>: búsqueda y descarga de imágenes

<http://www.pancroma.com/EO-1.html>

<https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/envisat>

<http://www.conae.gov.ar/satelites/sac-c/eo1.html>

<http://eo1.gsfc.nasa.gov/>

<http://eo1.usgs.gov/>

<http://cidc.udistrital.edu.co/investigaciones/documentos/revistacientifica/Fusion.pdf>

[http://www.srgis.cl/pdf/guia\\_basica\\_imagenes\\_satelitales.pdf](http://www.srgis.cl/pdf/guia_basica_imagenes_satelitales.pdf)

[http://landsat.usgs.gov/band\\_designations\\_landsat\\_satellites.php](http://landsat.usgs.gov/band_designations_landsat_satellites.php)

<http://www.ujaen.es/huesped/pidoceps/tel/archivos/2b.pdf>

### LIBROS DESTACADOS

PRÁCTICAS DE TELEDETECCIÓN Editorial Universidad Politécnica de Madrid

TELEDETECCION FUNDAMENTAL Santiago Ormeño Villajos Catedrático de E.U.

LA TELEDETECCIÓN. SUS BASES. Santiago Castaño Fernández, José Reyes Ruiz y Alicia Vela.

ACTUALIZACIÓN CARTOGRÁFICA CON IMÁGENES SATELITALES Mauricio Alfredo Arce y Gonzalo Luís Ortega

CORRECCIONES GEOMÉTRICAS DPTO. INGENIERIA CARTOGRAFICA, Carlos Pinilla Ruiz



## ANEXOS